

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2001

Jan Štrobl

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Jan Štrobl

CCD sky surveys: statistika s klasifikace

Astronomický ústav Univerzity Karlovy
Astronomický ústav Akademie věd České republiky

Vedoucí diplomové práce: RNDr. René Hudec, CSc.
Konzultanti: RNDr. Vojtěch Šimon, PhD.
Prof. Dr. Carl W. Akerlof

Studijní program: Astronomie a astrofyzika

Rád bych na tomto místě poděkoval všem osobám, které se o tuto práci nějak zasloužily. Tedy především René Hudcovi za příkladné vedení mé práce, Vojtěchu Šimonovi za mnoho cenných rad a pomoc při výběru studovaných objektů. Poděkování si rozhodně zaslouží i celý tým projektu ROTSE za pořízení a zapůjčení dat, jmenovitě pak především vedoucí týmu Carl Akerlof a Jim Wren, který trpělivě a ochotně reagoval na mé požadavky během přenosu dat. Mé poděkování dále rozhodně náleží Filipu Hrochovi za nedocenitelnou a rychlou pomoc při úpravách redukčního software, Davidovi Ondřichovi a především Martinovi Jelínkovi za vzájemné konzultace. A nakonec, děkuji i Astronomickému ústavu Univerzity Karlovy a jeho pracovníkům za podporu a poskytnutí počítačových prostředků během první fáze práce.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce.

V Praze dne 17.8.2001

Jan Štrobl

This project utilizes data obtained by the Robotic Optical Transient Search Experiment. ROTSE is a collaboration of Lawrence Livermore National Lab, Los Alamos National Lab, and the University of Michigan (www.umich.edu/~rotse).

Obsah

1	Úvod	6
2	Základy CCD fotometrie	8
2.1	Specifika a vlastnosti CCD fotometrie	8
2.2	Fyzikální charakteristika CCD zařízení	9
2.3	Korekce a primární zpracování snímků	11
2.4	Detekce objektů na snímcích a jejich fotometrie	12
2.5	Identifikace objektů	13
2.6	Kalibrace	13
3	Projekt ROTSE-I	17
3.1	Základní informace	17
3.2	Technické parametry	17
3.3	Pozorování	19
3.4	Kalibrace a analýza dat	20
3.5	Dosavadní výsledky	21
4	Konkrétní data: získání, zpracování, analýza	24
4.1	Získání dat	24
4.2	Výběr dat pro zpracování	25
4.3	Instrumentální kalibrace	26
4.4	Detekce a fotometrie objektů	27
4.5	Identifikace objektů na snímcích	30
4.6	Fotometrická kalibrace	31
4.7	Získání světelných křivek	34
5	Aplikace, fyzikální výsledky	38
5.1	Obecně	38
5.2	AS Cnc	38
5.3	AT Cnc	40
5.4	EF Cnc	41

5.5	RU Cnc	42
5.6	Test na neproměnných hvězdách	43
6	Diskuse	49
7	Závěr	51
	Reference	53
	Použitý software	55
A	Výpis důležitých skriptů	56
A.1	Skript „makeRefStarsDifsCompleteScript“	56
A.2	Skript „makeRefStarsDifs“	56
A.3	Skript „makeRefStarsDifsMean“	58
A.4	Skript „surveyMAT_with_ref_mean-All_script“	59
A.5	Skript „surveyMAT_with_ref_mean“	59
A.6	Skript „srt2tab“	60

Kapitola 1

Úvod

Dlouhodobé monitorování astrofyzikálních objektů má velký význam při jejich komplexním studiu a chápání souvisejících fyzikálních procesů. Přitom taková data jsou v astronomii poměrně řídká, před CCD monitory typu ROTSE jsme byli odkázáni jen na vizuální odhady a na obtížně přístupná data na archivních astronomických deskách. Nicméně již studie dlouhodobých změn, založené na těchto metodách, přinesly velmi cenné informace o řadě typů proměnných hvězd, o blazarech, kvazarech, aktivních galaxiích, protějšcích vysokoenergetických zdrojů a podobně. Jako příklad lze uvést největší známé amplitudy změn kvazarů (až 7 magnitud), založené právě na analýze dlouhodobých řad fotografických desek. Data z desek byla však až donedávna jenom obtížně zpracovatelná počítačem a vyžadovala znalost nestandardních dovedností a technik, což značně bránilo jejich většímu využití.

Monitorování, respektive přehlídka oblohy v optickém oboru spektra byla až donedávna výsadou fotografické techniky. Ačkoliv archivní fotografické snímky, pokrývající různé části oblohy, existují v počtu asi 3 milionů kusů na desítkách světových observatoří, kompletní přehlídka oblohy se prováděla jen na málo z nich a četnost jejich pozorování je navíc poměrně nízká, pouze několik desítek pozorování daného pole ročně.

V posledních letech přitom stále nabývá na významu multispektrální analýza objektů v několika spektrálních oborech současně a je často ironií, že na rozdíl od řady přehlídek z družic bývají často deficitní právě dlouhodobá data ve viditelném oboru spektra.

Použití CCD monitoru s velkým zorným polem pro přehlídku oblohy je tak spolu s aplikací moderních počítačů velkou šancí pro řadu oblastí moderní astronomie a astrofyziky. Jde však o novou metodu, prozatím bez jasně stanovených pravidel a postupů zpracování a využití, bez „vyšlapané cesty“.

Je jedním z cílů této práce jednu takovou „cestu“ vytvořit a ukázat, že data z CCD monitorů jsou cenná pro řadu oblastí. K tomuto účelu je využito

dat z projektu ROTSE-I, prvního z rutinně provozovaných širokoúhlých CCD monitorů, pokrývajících podstatnou část oblohy. Plány podobných projektů však existují i na řadě dalších míst a tedy zkušenosti, získané při zpracování dat projektu ROTSE-I, mohou snadno najít uplatnění i jinde.

Kapitola 2

Základy CCD fotometrie

2.1 Specifika a vlastnosti CCD fotometrie

Technologie CCD (zkratka z anglického „charge-coupled device“) zažila prudký vývoj v 80. letech dvacátého století a velmi brzy si našla své místo ve velmi rozličných odvětvích lidské činnosti - vědeckých a posléze i komerčních. A astronomie mezi nimi jistě zaujímá čestné místo.

Před příchodem CCD technologie se veškerá přesná a objektivní fotometrická měření prováděla za použití fotografie nebo fotometru (zcela záměrně vynechávám vizuální pozorování, neboť přesnost takových měření je nižší a objektivita v případě neopakovaných jevů sporná). CCD technologie tak přinesla další měřicí metodu, která dokonce ve velké míře nahradila především fotografii. Výhody CCD detektoru oproti fotografické emulzi by mohl v podstatných bodech vystihnout následující výčet:

- linearita detektoru – Změřená intenzita je lineární funkcí počtu zachycených fotonů a tedy i doby expozice. Takže pouhým prodlužováním doby expozice lze v principu detekovat a změřit stále slabší a slabší (ve smyslu méně vyzařující) objekty. Toto u fotografické emulze rozhodně neplatí. Ta je detektor přibližně logaritmický a po nějaké době tak u ní dochází ke stavu „nasycení emulze“ - ani velké prodloužení expoziční doby se neprojeví podstatným zvýšením detekce.
- větší citlivost – U CCD je QE (quantum efficiency, kvantová účinnost, tedy pravděpodobnost, že procházející foton bude zaznamenán) zhruba 50%, zatímco u fotografické emulze pouze 4-5%. V praxi se toto projevuje ve spojení s linearitou CCD tak, že pokud použijeme u fotografického detektoru expoziční dobu několika desítek minut, pak při použití CCD nám k získání ekvivalentního obrazu stačí expozice pouhých několika desítek sekund.

- rychlost zpracování – Není potřeba žádného dodatečného „vyvolávacího“ procesu, data jsou připravena již několik sekund po expozici.
- vhodnost pro počítačové zpracování – CCD zařízení je obvykle připojeno k PC, takže veškerá data jsou ihned k dispozici k jakémukoliv počítačovému zpracování a není je třeba nijak převádět.
- cenová efektivita – po pořízení CCD detektoru je cena každého snímku zanedbatelná, zatímco cena fotografických desek rozhodně nikoliv.

Jak je vidět, výhody CCD detektorů jsou velmi výrazné a v podstatě klasickou fotografickou měřicí metodu nahrazují. Zatím nepřekonanou výhodou fotografie ale nadále zůstává velké zorné pole ve spojení s výbornou rozlišovací schopností. Používání fotografických desek proto zatím zcela nevymizelo, i když je dnes již spíše výjimkou.

Na rozdíl od fotografie zůstává „postavení“ fotometru v astronomii prakticky bez poskvrnky, ten je totiž stále nejpřesnějším a nejcitlivějším fotometrickým přístrojem. I když snadnost měření a univerzálnost CCD přístrojů je jistě i zde velikou konkurencí.

2.2 Fyzikální charakteristika CCD zařízení

Základ celého CCD detektoru tvoří CCD čip. Jedná se o polovodičový prvek, z jedné strany pokrytý sítí na světlo citlivých pravidelných buněk, nazývaných pixely¹. Každý pixel představuje samostatnou detekční jednotku, která funguje na principu fotoelektrického jevu. V průběhu expozice dopadají na síť pixelů fotony, které způsobují (s již zmíněnou účinností QE) excitaci elektronů v místě dopadu. Na jednotlivých pixelech se tak hromadí elektrický náboj, který je po ukončení expozice důmyslnou metodou transportován přes ostatní pixely až k výstupnímu „vyčítacímu“ bodu, kde je změřena jeho velikost, která je dále přetransformována AD převodníkem do digitální podoby a následně pak postoupena spolu s ostatními hodnotami z celé sítě obsluhujícímu počítači. Digitální podoba naměřeného náboje je reprezentována číslem v rozmezí $0 \dots (2^N - 1)$, kde N je hodnota, udávající počet bitů AD převodníku. Takovéto číslo je pak obvykle uváděno s „virtuální“ jednotkou ADU.

¹Používání a skloňování anglického slova „pixel“ v češtině se může zdát poněkud nevhodné. Já jsem ale od něho neupustil, protože se jedná o výraz všeobecně zažitý nejenom v astronomickém, ale především počítačovém světě, a česká synonyma „bod“ nebo „obrazový prvek“ se mi nezdaří dostatečně výstižná.

Samozřejmě, celý problém není tak jednoduchý. Především se vedle žádaného fotoelektrického jevu na vzniku elektrického náboje na pixelu podílí i další fyzikální proces – termoemise. Ta způsobuje samovolnou emisi elektronů v pixelu, zvanou temný proud, doprovázenou navíc velkým statistickým rozptylem (tzv. tepelným šumem). Celý jev je ale naštěstí velmi závislý na teplotě, proto se (především kvůli omezení šumu) obvykle snižuje teplota CCD čipu na minimum – nejčastěji za pomoci Peltierových článků. Temný proud ale nelze ani potom zanedbat a jeho hodnota se musí následně redukovat pomocí tzv. temných snímků – DF (v angl. originálu „Dark Frames“).

Dalším problémem je nestejná citlivost pixelů v zorném poli. Tento problém se řeší opět následnou redukcí, pomocí tzv. plochých polí – FF (v angl. originálu „Flat Fields“).

Nepříjemná je i přítomnost tzv. vyčítacího šumu (v angl. originálu „readout noise“). Toto je šum, který vzniká při transportu náboje z pixelu až do vyčítacího zařízení a jeho velikost záleží pouze na kvalitách daného CCD detektoru. Jeho hodnota je ovšem vedle výše zmíněného tepelného šumu dalším faktorem, který se projeví ve výsledném „zašumění“ snímku.

Fyzikální vlastnosti konkrétního CCD čipu udává výrobce a bývají popsány následujícími hodnotami:

- velikost CCD čipu
- velikost jednoho pixelu
- velikost pole pixelů neboli počet pixelů na osách x a y
- „well depth“ – maximální počet elektronů, jaký se ještě udrží na jednom pixelu, aniž by došlo k „přetečení“ (angl. „blooming“) do okolních pixelů.
- „read noise“ – typická hodnota vyčítacího šumu
- „dark count“ – typická hodnota temného proudu při uvedené teplotě
- „digital resolution“ – počet bitů AD převodníku
- „system gain“ – doslova přeloženo „zisk“, udává počet elektronů, odpovídajících jednomu ADU.
- graf $QU(\lambda)$ – graf závislosti kvantové účinnosti na vlnové délce

Další cenné informace o nejenom technických parametrech a funkčnosti CCD detektorů lze získat např. v knize „Practical guide to CCD astronomy“ [2].

2.3 Korekce a primární zpracování snímků

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, snímky, pořízené CCD detektorem, je před astronomickým zpracováním nutné ještě poněkud upravit tak, aby se odstranily některé nedostatky CCD detektoru. Předně je třeba provést DF redukci. V průběhu světelné expozice se na jednotlivých pixelech nahromadil kromě signálu, způsobeného dopadem fotonů, i „falešný“ signál, pocházející od temného proudu - tedy termoemise. Toto je jev, který závisí na teplotě a při konstantní teplotě je z krátkodobého hlediska prakticky neměnný. Proto nejčastější a nejpřesnější metoda odstranění temného proudu ze snímku spočívá v průběžném získávání takzvaného temného snímku - tedy snímku „bez přístupu fotonů“, pořízeného za stejných podmínek (především teploty) a zcela identickým postupem, jako snímek světelný. Temný snímek tak představuje izolovanou informaci o temném proudu i v průběhu skutečné, „světelné“ expozice a pro eliminaci jeho vlivu tedy nezbyvá než temný snímek od světelného bod po bodu odečíst. Ovšem je nutné zdůraznit, že uvedená operace má opodstatnění pouze v případě, že teplota CCD čipu i doba expozice je u obou snímků totožná a časový interval mezi pořízením světelného a temného snímku je co nejmenší.

Podobně tomu je i v případě FF redukce. Zde je potřeba opravit snímek tak, aby byla smazána nestejná citlivost jednotlivých pixelů. Každý z pixelů je tedy třeba vynásobit odpovídající konstantou, čímž se dosáhne kýženého správného „naškálování“ jednotlivých pixelů detektoru. Za tím účelem se provádí snímání „rovného pole“ - obvykle expozicí rovnoměrně osvětlené plochy, oblohy za soumraku apod. Metody se různí, cílem však pokaždé je získat snímek konstantního jasu ve všech místech zorného pole. Takový snímek se pak nazývá „flat-field“ a má tu vlastnost, že v sobě nese informaci o citlivosti jednotlivých bodů detektoru. Hodnoty ADU jednotlivých pixelů flat-field snímku se pak „znormují“ vydělením maximální hodnotou ADU na tomto snímku a takto vzniklým polem „vah“ se pak vydělí reálný snímek. Redukce flat-field snímkem navíc současně odstraňuje i další nežádoucí efekty, způsobující sníženou citlivost detekce intenzity světla v jednotlivých pixelech - například vinětaci pole (mimoosové paprsky jsou zobrazovací soustavou oslabeny) a nepříznivé fotometrické vlastnosti optické soustavy vůbec.

FF i DF snímky se v průběhu delšího časového období mění. DF se ale mění výrazně rychleji a měl by být snímán několikrát za noc, přinejmenším alespoň denně.

Nevýhodou takovýchto jednoduchých redukcí je fakt, že jak DF tak FF v sobě nese informaci, ovlivněnou šumem stejně, jako samotný snímek. Aplikací takových snímků se tedy opětovně zvýší statistická chyba v určení fotometrických veličin. Tomuto efektu se dá v praxi zamezit, pokud k redukci

využijeme místo jednoho DF resp. FF snímek, získaný „zprůměrováním“ většího počtu odpovídajících snímků.

Oba popsané procesy jsou poměrně jednoduché a masově používané, a proto existuje i velké množství již hotových volně šiřitelných počítačových programů a utilit, které je provádějí. Za všechny budu jmenovat utility, obsažené v balících software „ccdpack“ [14] nebo „munipack“ [13].

2.4 Detekce objektů na snímcích a jejich fotometrie

Data, pořízená CCD detektorem, jsou díky podstatě detektoru vlastně snímky, přestože jednotlivé body těchto snímků nesou na snímek extrémně přesnou fotometrickou informaci. Při správném zobrazení na monitoru (například programem „GAIA“ [15]) tedy není pro lidské oko problém rozeznat na takových snímcích jednotlivé hvězdné objekty.

Pokud má podobnou identifikaci provést samostatně počítač, jedná se o poměrně komplexní problém hledání lokálních maxim funkce dvou diskrétních proměnných. Součástí identifikace je i získání co nejpřesnějších souřadnic všech nalezených objektů, k čemuž je potřeba provést alespoň jednoduchý fit předpokládaného přibližného profilu na hodnoty intenzity, obsažené v pixelech.

Na proces detekce a lokalizace hvězd (resp. objektů vůbec) pak může navázat snaha vytěžit ze snímku fotometrickou informaci. K tomu se využívají dvě metody:

- aperturní metoda
- metoda fitování profilů

Aperturní metoda je velmi primitivní, nicméně velmi rychlá a poměrně účinná. Spočívá v pomyslném „položení“ apertury o předem definovaném poloměru kolem všech hvězd na snímku a následném „zintegrování“ signálů z těchto apertur. Po odečtení hodnoty šumu tak (za předpokladu vhodně zvolené apertury a pouze jedné hvězdy v apertuře) tímto způsobem získáme celkový signál, který hvězda na detektoru vyvolala. A pokud známe hodnotu zisku („gain“) kamery, známe i počet fotonů, které signál vyvolaly a tedy i intenzitu světla, která přichází od daného objektu a můžeme tím pádem vypočítat i jeho diferenciální (ve srovnání s jinými objekty na snímku) relativní hvězdnou velikost, i když samozřejmě jen ve specifickém fotometrickém systému, daném citlivostí kamery v celém spektrálním oboru.

Problém s aperturní metodou vyvstane ve chvíli, kdy se na snímku vyskytnou hvězdy ve své těsné blízkosti, takže je není možné aperturou přesně oddělit. Integrovaný signál z apertury pak neobsahuje pouze světelnou informaci o jedné hvězdě, ale zabírá navíc i jistou, velmi těžko definovatelnou část signálu z jiné hvězdy. V takovém případě se plně projeví výhoda druhé metody - metody fitování profilů.

Jak už název napovídá, metoda fitování profilů provádí fit předpovězeného tvaru profilu na změřené hodnoty intenzit v poli pixelů. Tato metoda je schopna zidentifikovat a fotometricky proměřit i velmi blízké objekty. Její velkou nevýhodou je ovšem zcela logicky velká výpočtová náročnost.

V praxi se dají na detekci a fotometrii objektů v CCD polích použít například následující balíky software: „Extractor“ [16], „ccdpack“ [14] nebo „munipack“ [13].

2.5 Identifikace objektů

Mohlo by se zdát, že detekcí a fotometrií objektů na snímku je celý problém vyřešen a zpracování snímku tím končí. Bohužel, asi nejnáročnější proces ale teprve musí přijít.

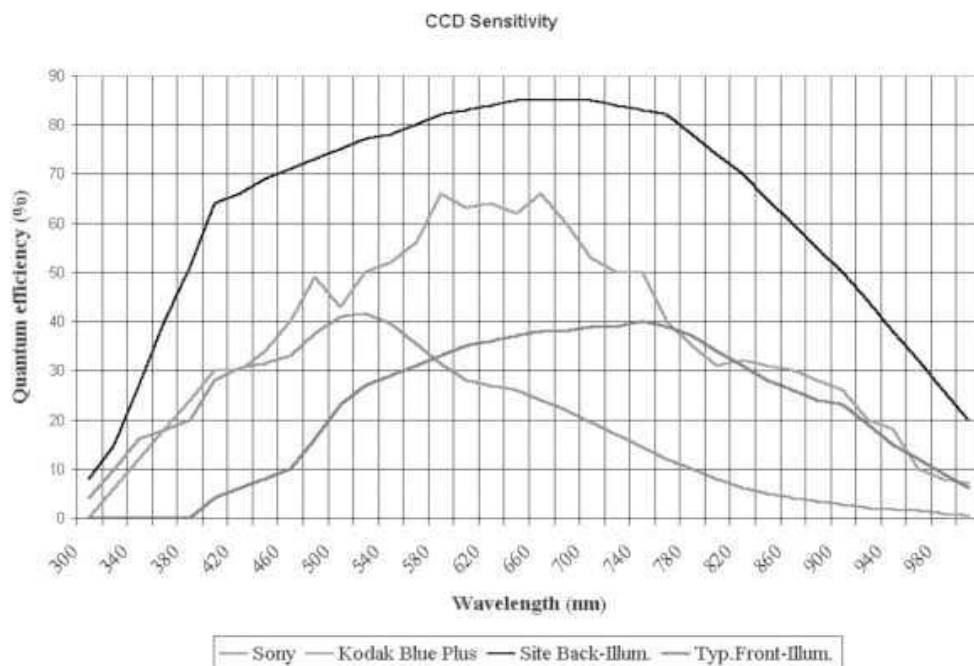
K tomu, aby získané informace o objektech měly nějaký význam, musí být totiž známo, ke kterému reálnému objektu se vztahují. Je tedy třeba provést identifikaci objektů na snímku podle katalogu nebo alespoň podle jiného (referenčního) snímku.

Metoda, jak zjistit libovolnou transformaci, složenou z libovolné kombinace posunutí, pootočení, zrcadlového převrácení nebo zvětšení/zmenšení je v principu poměrně jednoduchá. Zakládá se na hledání podobných trojúhelníků v obou polích. Problémem zde však je velká výpočtová náročnost při zvyšování počtu bodů (počet operací roste jako $O(n^6)$, podle [13]), proto se většinou používají zjednodušené metody.

Takovou metodu využívá například i program „munimatch“, který je součástí balíku „munipack“ [13].

2.6 Kalibrace

Po úspěšném zvládnutí všech do této chvíle zmíněných procesů se dostáváme do situace, kdy máme ze snímku vytěžené veškeré možné informace - známe polohy a intenzity všech objektů na snímku a dokonce víme, který z objektů na snímku odpovídá kterému reálnému objektu v katalogu. Zbývá pouze přesně okalibrovat změřené intenzity tak, aby odpovídaly skutečným



Obrázek 2.1: Závislost kvantové účinnosti QE na vlnové délce pro různé CCD čipy. (zdroj [6])

hodnotám. To je poměrně nesnadný úkol, mnohem nesnadnější, než by se mohlo na první pohled zdát.

Předně je třeba si uvědomit, že relativní hvězdná velikost, kterou měříme, je vždy vztažena k danému fotometrickému systému, reprezentovanému rozsahem vlnových délek elektromagnetického vlnění, které náš detektor zaznamenává. K vymezení fotometrických systémů se používají přesně definované filtry, propustné pro elektromagnetické záření jenom v jistém rozsahu přesně definovaných vlnových délek. Máme tak filtry U, B, V, R, I i jiné.

V případě, že použijeme takovýto filtr a vložíme ho před CCD detektor, vstupují na detekční plochu CCD čipu pouze fotony specifického rozmezí vlnových délek s četností, odpovídající stupni propustnosti filtru pro danou vlnovou délku. Toto ale bohužel ještě neznamená, že by hodnoty, změřené detektorem, odpovídaly danému fotometrickému systému. Věc se totiž komplikuje závislostí QE (quantum efficiency, kvantová účinnost) na vlnové délce (ukázka takových závislostí pro různé CCD čipy je na obrázku 2.1 - zdroj [6]). V důsledku nekonstantní citlivosti kamery pro různé detekované vlnové délky totiž může docházet ke zmenšení pravděpodobnosti detekce některých vlnových délek a tedy i k výrazným odchylkám od standardního systému.

V praxi se tyto odchylky často zanedbávají, což má ale své opodstatnění pouze tehdy, pokud je hodnota QE v rozmezí filtrem „propouštěných“ vlnových délek přibližně konstantní.²

Při pozorování, prováděném bez filtru, je měřena relativní hvězdná velikost ve fotometrickém systému, definovaném právě touto závislostí. Takové měření je využíváno hlavně pokud je potřeba co nejvíce využít citlivosti detektoru (použití filtrů samozřejmě citlivost přístroje snižuje). I v tomto případě je ale vhodné, pokud můžeme naměřená data nějakým způsobem navázat na ostatní měření, prováděná ve standardních fotometrických systémech. Toto je možné provést přibližným výpočtem. Dá se totiž najít funkce relativních hvězdných velikostí ve standardních filtrech $f(m_U, m_B, m_V, \dots)$ taková, že pro změřenou hodnotu relativní hvězdné velikosti každé hvězdy m_{CCD} platí vztah:

$$m_{CCD} \approx f(m_U, m_B, m_V, \dots). \quad (2.1)$$

Obvykle přitom stačí závislost na dvou proměnných, například m_V a m_B . Typický vztah pak vypadá takto:

$$m_{CCD} \approx m_V - konst.(m_B - m_V) \quad (2.2)$$

Nejjednodušší způsob kalibrace pak může vypadat tak, že v zorném poli vybereme jednu nebo raději několik dobře fotometricky proměřených hvězd, zjistíme jejich naměřenou či publikovanou relativní hvězdnou velikost ve filtru, který používáme, případně pro pozorování bez filtru vypočítáme předpokládanou hvězdnou velikost podle vztahu 2.2. Odečtením změřené hvězdné velikosti od této vypočítané pak dostaneme konstantu, kterou je potřeba přičíst ke každé změřené hvězdné velikosti zorného pole, čímž se dosáhne požadované kalibrace. Pokud uvedenou konstantu změříme u více hvězd, můžeme ji statisticky zpracovat a získat tak přesnější výsledek.

Na tomto místě je třeba upozornit na skutečnost, že uvedená kalibrace platí jenom pro malé úhlové vzdálenosti od referenční hvězdy a jenom pro daný snímek. Kalibrace totiž v sobě zahrnuje opravu o atmosférickou extinkci pro referenční hvězdu, na které byla kalibrace změřena. Atmosférická extinkce se ale mění s časem a se zenitovou vzdáleností. V malých úhlových vzdálenostech ji můžeme považovat za konstantní. Ovšem tomuto kritériu „malých vzdáleností“ nemusí u zobrazovacích soustav s krátkým ohniskem a velkým CCD čipem vyhovovat třeba ani velikost zorného pole.

V případě většího množství referenčních hvězd lze ještě zkontrolovat a případně opravit velikost „jedné magnitudy“, tedy správného naškálování

²U čočkových objektivů se ještě přidává selektivní absorpce objektivu, zejména na straně krátkých vlnových délek.

pomyslné stupnice měřené relativní hvězdné velikosti. Toto lze asi nejsnáze provést proložením přímky v grafu, kde je pro jednotlivé referenční hvězdy vynesena vypočítaná (předpovězená) hvězdná velikost vůči změřené hvězdné velikosti. Směrnice přímky pak udává jakýsi „škálovací koeficient“, kterým je potřeba vynásobit hodnoty změřených hvězdných velikostí, aby hodnota Δm odpovídala skutečnosti. Tato případná odchylka pramení z nepřesnosti v určení hodnoty zisku („gain“) CCD čipu a je v čase stálá. Není tedy problém uvedeným způsobem zjistit směrnici přímky z více snímků a statisticky ji zpracovat.

Kapitola 3

Projekt ROTSE-I

3.1 Základní informace

Projekt ROTSE-I (zkratka od „The Robotic Optical Transient Search Experiment“) je speciální automatické observační zařízení, určené a přizpůsobené pro hledání a detekci astrofyzikálních optických transientů, speciálně pak těch, spojených se „záblesky gama“ (GRB). Jeho úkolem je tedy velmi rychle reagovat na podněty o detekovaném záblesku gama, přicházející z družice, a v co nejkratším čase začít pořizovat snímky odpovídající části oblohy. Ve zbytku času pak provádí každodenní systematickou prohlídku celé viditelné oblohy. Svým určením je tedy projekt ROTSE-I typickou ukázkou „robotického“ systému na detekci GRB, stejně jako řada dalších projektů z celého světa: TAROT, BART, BOOTES, LOTIS a možná i další.

Projekt ROTSE I vznikl společným úsilím těchto institucí: University of Michigan [7], Los Alamos National Laboratory [8] a Lawrence Livermore National Laboratory[9]. Je fyzicky umístěn v Los Alamos v Novém Mexiku a pracuje systematicky od března roku 1998 až do současnosti.

3.2 Technické parametry

Projekt ROTSE-I je vybaven technickými parametry, které odpovídají požadavkům na pozorování optických protějšků GRB v době jeho vzniku: základními jmenovateli tedy jsou:

- velmi velké zorné pole spojené s dostatečným úhlovým rozlišením
- vysoká rychlost navádění na vybrané zorné pole



Obrázek 3.1: Členové týmu experimentu ROTSE Jim Wren a Bob Kehoe při kontrole čtyřkamerového systému ROTSE-I. (zdroj [10])

- vysoká rychlost snímání (tedy velká citlivost CCD čipu) a vyčítání dat z kamery

Projekt je tedy vybaven čtyřmi CCD kamerami AP-10 od firmy Apogee Instruments Inc [6] s velkoplošnými CCD čipy Thomson THX7899M s velkým počtem pixelů (2048 x 2048). Každá z kamer je vybavena objektivem Canon o ohniskové vzdálenosti 200mm a světelnosti $f/1,8$ a snímá tak čtvercové zorné pole o hraně 8° . Všechny čtyři detektory pak jsou pevně umístěny na společné „rychlé“ montáži a dohromady vytvářejí mozaiku čtvercového zorného pole o hraně 16° . Uspořádání kamer a konstrukce celého systému je patrná na obr. 3.1.

CCD kamery AP-10 mají následující parametry (viz [6]):

- CCD čip: Thomson THX7899M
- pole pixelů: 2048 x 2048
- velikost jednoho pixelu: $14 \mu\text{m}$
- rozměry CCD čipu: 28,7 x 28,7 mm

- „Well Depth“ (maximální udržitelná úroveň náboje v pixelu): 200000 e^-
- „Read Noise“ (vyčítací šum): 25 e^- při rychlosti 10^6 pixelů za sekundu.
- „Dark Count“ (temný proud): 25 pA/cm^2 při 25 °C
- „Digital Resolution“ (digitální rozlišení): 14 bitů
- „System Gain“ (zisk): $10 - 13\text{ e}^-/\text{ADU}$
- QE (kvantová účinnost): odpovídá typickému „front-illuminated“ detektoru (viz graf na obr. 2.1).

Kvůli dosažení co největší citlivosti jsou přístroje používány bez standardních fotometrických filtrů.

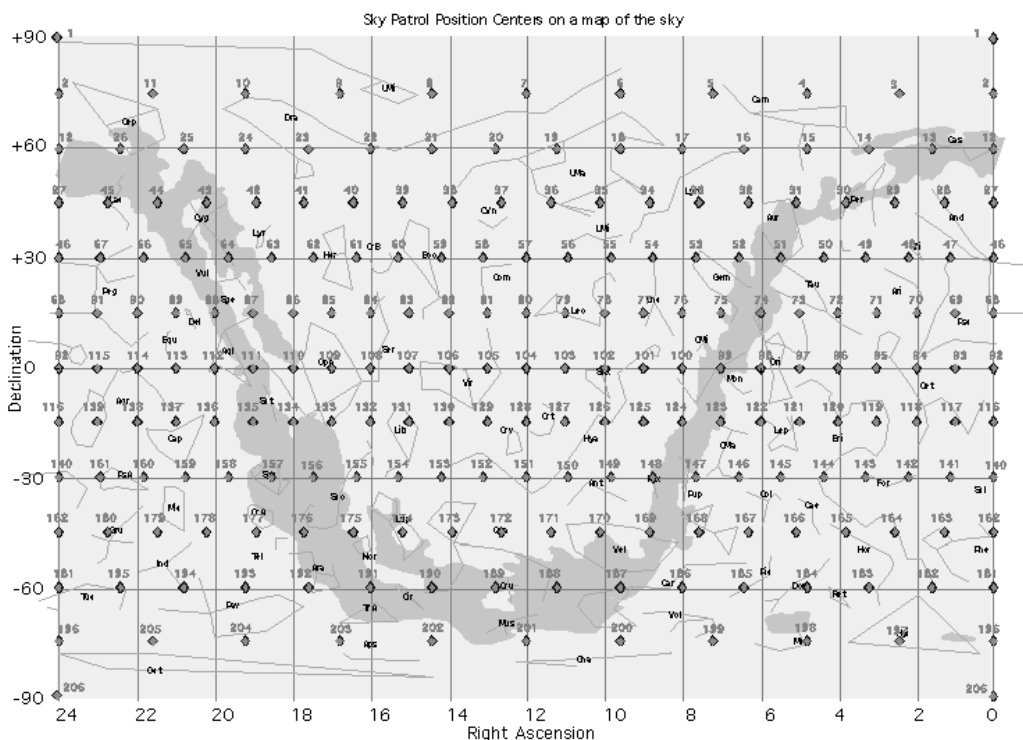
Celý systém je plně automatizován a funguje zcela bez zásahu člověka - a to včetně detekce a monitorování počasí a pozorovacích podmínek a s tím spojeného ovládání „střežky“. O ovládání celého systému se stará pět počítačů s operačním systémem Linux.

3.3 Pozorování

ROTSE-I provádí dva typy pozorování:

- „Každodenní“ činností teleskopu je snímkování celé viditelné oblohy. Vzhledem k rychlosti celého systému a velikosti zorného pole zvládne tuto činnost několikrát za noc. Snímkování je prováděno vždy ve stejných, předem definovaných polích. Jejich umístění na obloze je patrné z obr. 3.2. Pole, vhodná danou noc k pozorování, vybere systém automaticky tak, aby jejich zenitová vzdálenost při pozorování byla větší než 20° . Délky expozic jsou rovněž konstantní (80 s), mění se pouze v období kolem úplňku (na 20 s).
- „Přednostní“ činnost teleskopu se zakládá na pozorování oblasti na obloze, ve které byl pomocí družice detekován GRB (záblesk gama). V případě, že přijde informace o detekci, systém ihned ukončí současnou činnost a začne se věnovat výhradně snímkování inkriminované oblasti.

Donedávna byla detekce, spojená s určením polohy zdroje, poměrně málo častá a každodenní „přehlídková“ činnost tak byla přerušena přibližně pouze jednou za 10 dní.



Obrázek 3.2: Umístění a označení středů zorných polí, ve kterých probíhá pravidelná přehlídka oblohy projektu ROTSE-I. (zdroj [10])

3.4 Kalibrace a analýza dat

Zvláštní pozornost se v projektu ROTSE-I věnuje instrumentální kalibraci. V průběhu každé noci je pořízena sekvence dvanácti temných snímků (DF), které jsou následně zprůměrovány („mediánováním“) do jednoho snímku s „potlačeným“ šumem. Tento snímek je pak využíván k DF redukci všech ostatních snímků.

Vytváření flat-field (FF) snímků je prováděno dodatečně zvláštní metodou - mediánováním veškerých snímků, pořízených v průběhu noci a následně samozřejmě opravených o DF. Vzhledem k vysokému počtu snímků zcela rozdílných polí je toto klasifikováno jako velmi přesná a kvalitní metoda získání jednoho flat-field snímku pro každou noc.

Pro detekci objektů na snímcích byl použit balík software SExtractor (Bertin & Arnouts 1996) [16], pro další zpracování pak rutiny pro IDL, vytvořené na University of Michigan [7].

Fotometrická kalibrace byla provedena na základě katalogu TYCHO (Hog 1998). Katalog TYCHO je odvozen z pozorování družice Hipparcos a obsa-

huje přesně astrometricky a fotometricky (v standardních filtrech B a V) proměřené objekty. Protože je pozorování ROTSE-I prováděno bez standardních filtrů, bylo třeba stanovit vztah typu 2.2. Empiricky byl tedy zjištěn vzorec:

$$m_{ROTSE} \approx m_V - (m_B - m_V)/1.875 \quad (3.1)$$

Pomocí tohoto vztahu byla provedena kalibrace změřených hvězdných velikostí. Změřená relativní hvězdná velikost tím je pro průměrnou hvězdu katalogu TYCHO jenom málo odlišná¹ od měření ve filtru V.

Mezní dosah snímků byl určen jako 15.5 mag.

3.5 Dosavadní výsledky

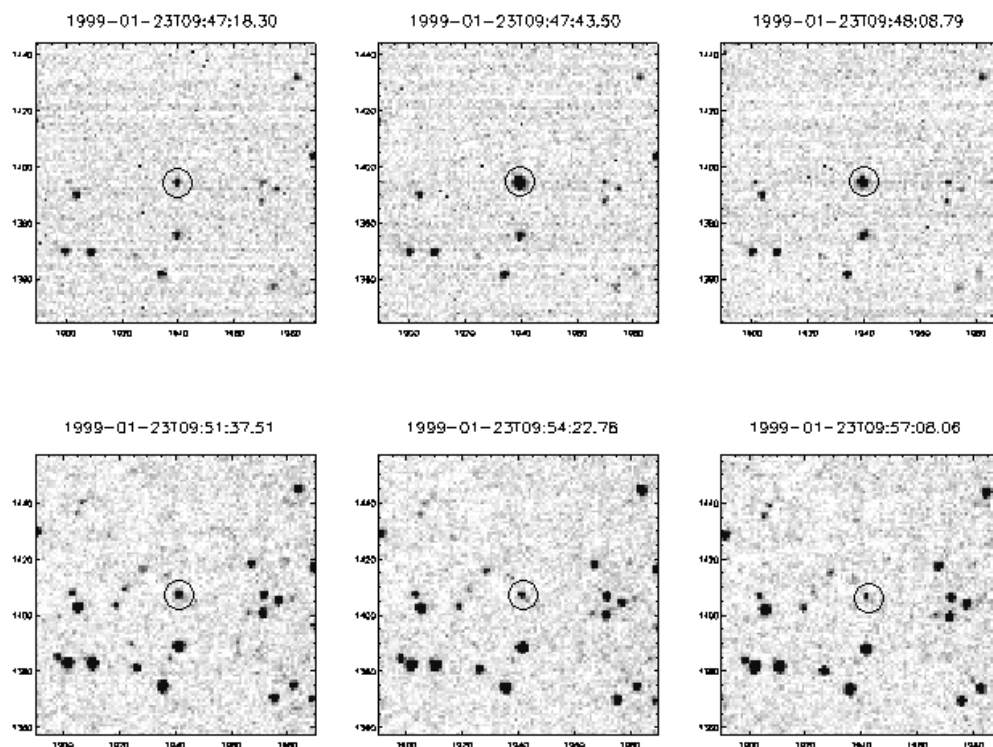
Dosavadní analýzy dat byly velmi úspěšné a dočkaly se několika publikací. Odkazy na ně, včetně „on-line“ informací, jsou k dispozici na internetových stránkách projektu ROTSE [10]. V následujících řádcích se pokusím vybrat některé zajímavé výsledky.

Určitě největším úspěchem projektu ROTSE-I se stalo pozorování přímého optického protějšku (optického transientu, který na rozdíl od dosvitu přímo doprovází GRB) záblesku gama „GRB 990123“. Teleskop při něm „vystihl“ okamžik maximálního zjasnění, díky čemuž bylo možné sestavit světelnou křivku záblesku včetně krátkého okamžiku před dosažením maximální intenzity. Snímky záblesku jsou na obrázku 3.3, jeho světelná křivka pak na obrázku 3.4.

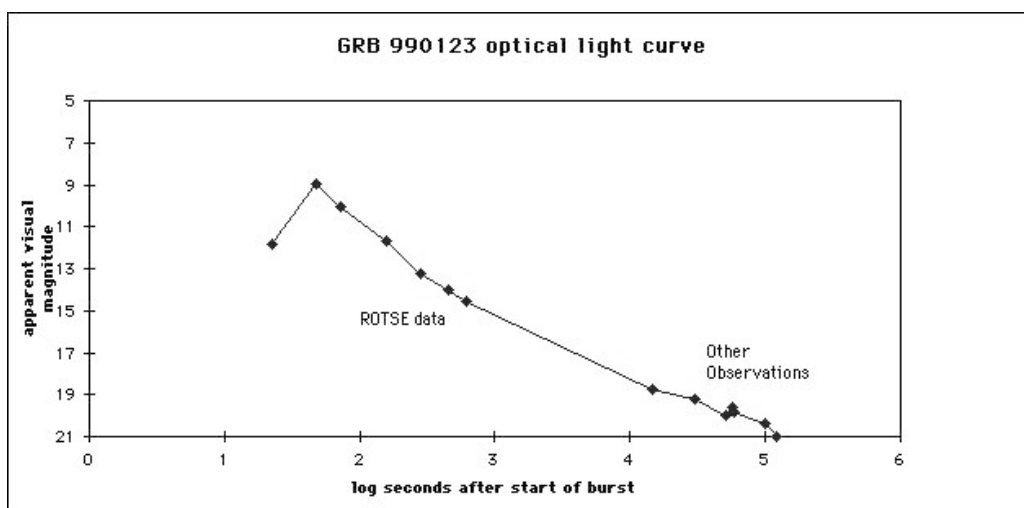
Velmi zajímavá je i studie, označovaná jako RSV1 („ROTSE Variable Survey I“), založená na dlouhodobých pozorováních pravidelné „přehlídky oblohy“. Vzhledem k obrovskému množství dat sice zatím bylo zpracováno pouze necelých 6 % oblohy (vybraných devět polí), výsledky jsou však přesto velmi imponující. Na časové řady snímků byl aplikován speciální algoritmus na hledání objektů s proměnnou světelnou intenzitou, spojený s automatickou klasifikací některých druhů proměnnosti. Pozornost byla soustředěna na periodické proměnné hvězdy typů RR Lyr, δ Scuti, těsných dvojhvězd a hvězd s pravidelnou středně dlouhou a dlouhou periodou. Shrnutí výsledků pro daný typ hvězd ukazuje následující výčet:

- RR Lyrae: Detekováno 201 objektů typu RRab, z čehož je 134 nově objevených. Dále pak 124, z čehož 113 nových RRc.

¹Míra této odlišnosti je patrná z grafů, získaných při méj analyze. Viz obrázky 4.5 a 4.6 dále v textu.



Obrázek 3.3: Řada snímků, pořízených přístrojem ROTSE-I, s označenou detekcí optického protějšku GRB 990123. (zdroj [10])



Obrázek 3.4: Světelná křivka optického protějšku GRB 990123. (zdroj [10])

- Těsné dvojhvězdy, většinou typu W UMa: 423 detekcí, z toho 407 dosud neznámých. Některé z detekcí budou možná časem překlasifikovány na typ β Lyrae.
- Další zákrytové systémy: Identifikováno 135, včetně 118 ještě neobjevených.
- δ Scuti: Odhaleno celkem 103 kandidátů, 100 nových.
- Cefeidy: 218 nových kandidátů, až na 2 jsou všechny nové. Některé z objektů budou možná časem přerazeny, např. k typu RS CVn.
- Hvězdy typu Mira: 164 objektů, z toho 102 nových.
- Dlouhoperiodické proměnné hvězdy: detekováno 706, 646 z nich dosud není v GCVS.

Celkem bylo bezpečně detekováno 1781 proměnných objektů, přičemž 90 % z nich dosud není obsaženo v GCVS („General Catalog of Variable Stars“). Popis, výsledky a informace o RSV1 je možné získat z publikace v ApJ [3] nebo na internetu [5]. Veškeré další informace o projektu ROTSE je možné čerpat z internetového zdroje [10].

Kapitola 4

Konkrétní data: získání, zpracování, analýza

4.1 Získání dat

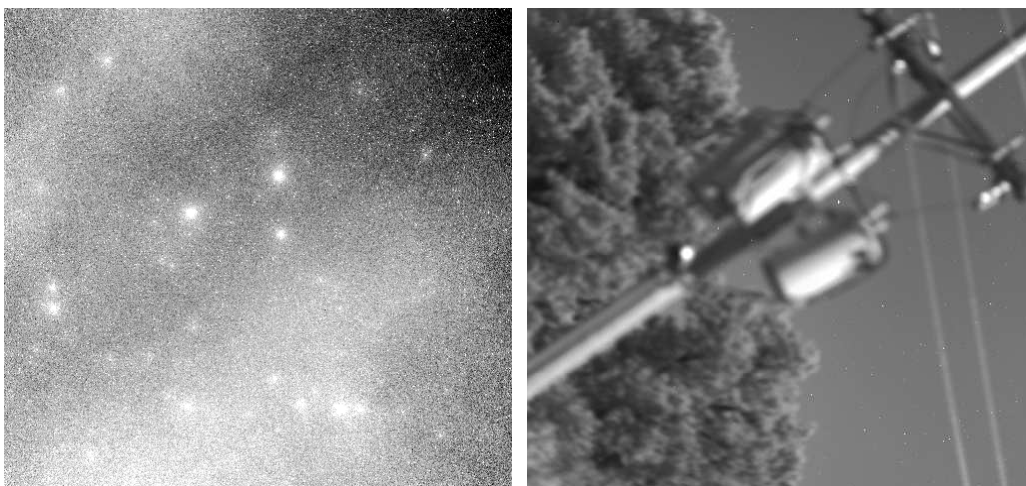
Politika spolupráce projektu ROTSE je popsána na internetových stránkách celého projektu [10]. Mimo jiné umožňuje zapůjčení dat do 1 % celkového objemu všech dat projektu ROTSE institucím nebo osobám, které se na projektu přímo nepodílejí. Podmínkou ovšem je podání žádosti s uvedením zamýšleného výzkumu, který nesmí kolidovat se zájmy projektu a institucí, do něho zapojených, a musí být jimi schválen. V následných publikacích, založených na těchto datech projektu ROTSE pak musí být v přesné formulaci uvedena věta, oznamující původ dat.

Nabídku ke spolupráci, spojenou s žádostí o zapůjčení dat, podal v květnu roku 2000 RNDr. René Hudec, CSc. Vzhledem k (nejenom) jeho předcházející dlouhodobé spolupráci s University of Michigan na poli výzkumu optických transientů (OT) a záblesků gama „GRB“ byla žádost bez problémů schválena a zanedlouho potom byl zahájen přenos dat. Pro tým ROTSE šlo o první takovou spolupráci a předání dat zahraničnímu týmu.

Žádost se týkala poskytnutí kompletních časových řad dvou zorných polí pravidelné prohlídky:

- pole č. 44: umístění v „Mléčné dráze“ (suhvězdí Labutě), souřadnice středu (ekvinokcium 2000): $\alpha = 21^{\text{h}} 28.0^{\text{m}}$, $\delta = 45.0^{\circ}$
- pole č. 54: umístění mimo „Mléčnou dráhu“ (suhvězdí Raka), souřadnice středu (ekvinokcium 2000): $\alpha = 8^{\text{h}} 43.0^{\text{m}}$, $\delta = 30.0^{\circ}$

Přibližné umístění polí je patrné z obrázku 3.2.



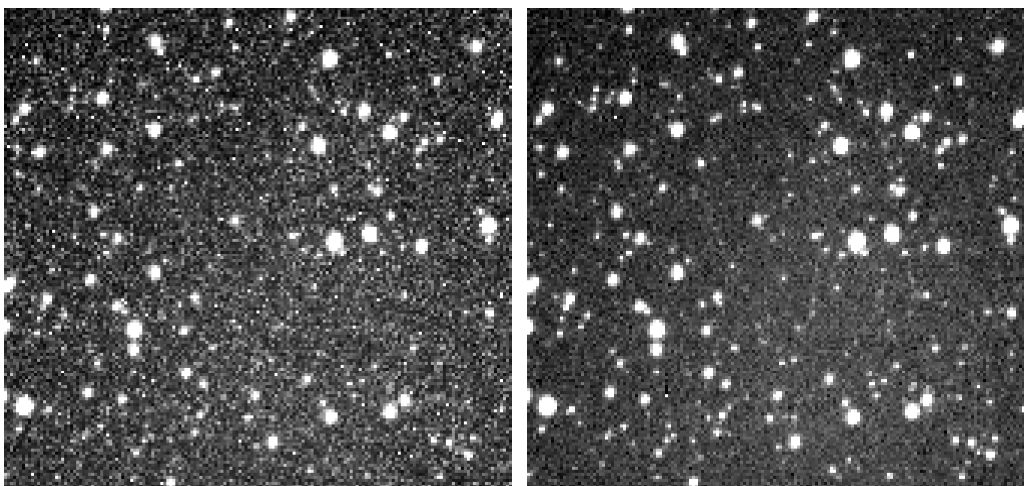
Obrázek 4.1: Ukázka nekvalitních dat. I takovéto snímky se v souboru vyskytly a bylo nutné je manuálně vyřadit.

Prvním problémem, který bylo třeba vyřešit, se stala otázka přenosu dat do ČR. Po jednáních a konzultacích se zahraničními partnery se jako optimální ukázala být přeprava přes internet protokolem FTP. Stahování dat pak probíhalo (nekontinuálně) v období červen 2000 - leden 2001 a data byla průběžně ukládána na CD disky. Výsledkem je kolekce 134 CD disků (přibližně 85 GB komprimovaných dat), zahrnujících snímky dvou zmíněných polí v období květen 1998 - červenec 2000.

4.2 Výběr dat pro zpracování

Vzhledem ke čtyřkamerovému uspořádání teleskopu získaná data ve své podstatě představují časové řady osmi snímků, které je potřeba zpracovávat odděleně. Protože je veškeré zpracování (vzhledem k obrovskému počtu a objemu dat) velmi náročné na systémové prostředky a výpočtový čas počítače a cílem této práce rozhodně není zpracovat co největší množství dat, byla nakonec pro zpracování vybrána pouze časová řada jediné CCD kamery jednoho pole (tedy přibližně 1/8 dat), konkrétně tedy zorné pole číslo 54b o souřadnicích středu (ekvinokcium 2000): $\alpha = 8^{\text{h}} 27.0^{\text{m}}$, $\delta = 26.0^{\circ}$.

Snímky vybraného zorného pole byly navíc později (po instrumentální kalibraci) manuálně přebrány, takže byly z dalšího zpracování odstraněny nekvalitní, rozostřené, případně vůbec nepovedené (viz např. obrázek 4.1) snímky. Tento krok by šel pravděpodobně vypustit a použít místo něj například kritérium na počet detekovaných objektů, vzhledem k velkému objemu



Obrázek 4.2: Ukázka efektu, jaký má na snímek aplikace DF. Na obrázku je zobrazena pouze malá část snímku.

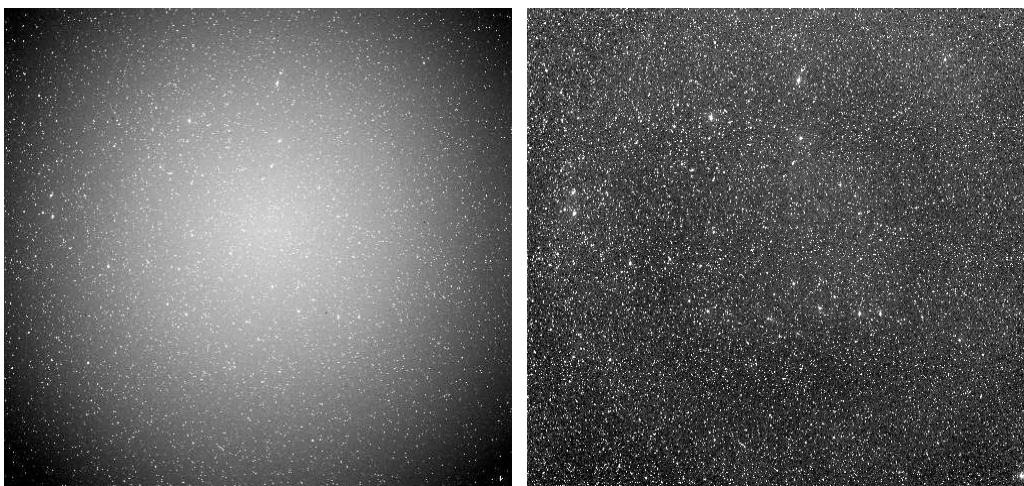
dat a velké výpočtové náročnosti procesů je ale spíše vhodné manuální selekci provést, už z důvodu, že je díky ní garantována jistá kvalita dále zpracovávaných dat. Manuální selekce byla provedena až po instrumentální kalibraci, neboť pak bylo možné manuálně vyřadit i snímky s nedostatečně plochým polem.

4.3 Instrumentální kalibrace

Instrumentální kalibrace se zakládala na aplikaci příslušných temných (DF) a flat-field (FF) snímků. Přestože byla data poměrně kompletní, v některých případech absence odpovídajícího DF/FF snímku bylo zapotřebí použít snímek z blízké noci.

V tomto kroku byly použity utility „darkbat“ a „flatbat“ ze softwarového balíku „muniphot“ [13]. Ke správné funkčnosti obou programů ale bylo zapotřebí dodat do hlaviček snímků (soubory typu .fit) položku „SATURATE=16383“. Toto jsem provedl pomocí jednoduchých utilitek, které jsem naprogramoval v jazyce C za pomoci speciální knihovny „cfitsio“ [17].

Celý proces, počínaje kopírováním vybraných dat z CD disků, přes jejich dekomprimaci, testování délky souborů (některé soubory byly defektní a měly tedy nesprávnou délku), výběr odpovídajících DF a FF souborů (nejenom podle data, ale u DF rovněž podle délky expozice), až po vlastní kalibraci probíhal zcela automaticky díky celé řadě poměrně komplexních „shell“ skriptů a utilitek vlastní výroby.



Obrázek 4.3: Ukázka, jak se na celém snímku projeví aplikace FF.

Příklady efektu aplikace DF a FF na data z projektu ROTSE jsou zobrazeny na obrázcích 4.2 a 4.3.

4.4 Detekce a fotometrie objektů

Jak již bylo řečeno, členové týmu ROTSE používají na detekci objektů na snímcích osvědčený programový nástroj „SExtractor“ [16]. Já jsem se nakonec, po testování různých software (včetně zmíněného), rozhodl k používání programu „muniphot“, který je součástí balíku programů „munipack“ [13]. Důvody byly následující:

- Celková integrace různých součástí balíku „munipack“ umožňuje využít libovolný z nástrojů bez nutnosti formátové konverze.
- Zdrojový kód je k dispozici, je poměrně jednoduchý a tedy i snadno obměnitelný.
- Autor Filip Hroch je k dispozici ke konzultacím i případným úpravám software.
- Data z projektu ROTSE jsou výborným testem kvalit programu.

Program muniphot byl spuštěn s následující konfigurací (část souboru „mphot.opt“:

```

READ NOISE (ADU; 1 frame) = 2.3
GAIN (e-/ADU; 1 frame)   = 11
LOW GOOD DATUM (in sigmas) = 7
HIGH GOOD DATUM (in ADU)  = 16300
FWHM OF OBJECT           = 1.4
THRESHOLD (in sigmas)     = 20.0

```

První dvě položky jsou parametry CCD kamery, další dvě pak udávají rozmezí jednotek ADU, ještě vhodných pro fotometrii. FWHM je přibližná pološířka profilů hvězd (tento parametr lze manuálně zjistit např. pomocí programu „GAIA“ [15]) a THRESHOLD udává v násobcích šumu prahovou hodnotu detekce objektů.

Velikost jednotlivých apertur, ve kterých probíhá fotometrické měření, je určena ve druhém konfiguračním souboru – „mphoto.conf“:

```

A1  RADIUS OF APERTURE  1  = 2.0
A2  RADIUS OF APERTURE  2  = 2.7273
A3  RADIUS OF APERTURE  3  = 3.8182
A4  RADIUS OF APERTURE  4  = 5.2727
A5  RADIUS OF APERTURE  5  = 7.0909
A6  RADIUS OF APERTURE  6  = 9.2727
A7  RADIUS OF APERTURE  7  = 11.8182
A8  RADIUS OF APERTURE  8  = 14.7273
A9  RADIUS OF APERTURE  9  = 18.0
AA  RADIUS OF APERTURE 10  = 21.6364
AB  RADIUS OF APERTURE 11  = 25.6364
AC  RADIUS OF APERTURE 12  = 30.0
IS      INNER SKY RADIUS = 20.0
OS      OUTER SKY RADIUS = 30.0

```

Poslední konfigurační soubor, „muniphot.com“, udává sérii „příkazů“, které program muniphot postupně provádí:

```

attach
find 1 1
photometry
sort AP N +8

```

Jednotlivé položky jsou standardní a jsou dobře popsány v dokumentaci balíku munipack [13]. Podstatný je zde poslední řádek, který určuje, že jednotlivé objekty budou ve výstupním souboru *.SRT seřazeny podle hvězdné

velikosti, vypočítané z měření, pořízených aperturou č.5. Seřazení objektů je důležité vzhledem k dalším analýzám snímku.

Výstupem programu je několik souborů, z nichž pro další analýzu je pro nás důležitý pouze již zmíněný soubor s příponou „.SRT“. Výpis ze souboru SRT vypadá takto:

NL	NX	NY	LOWBAD	HIGHBAD	THRESH	AP1	PH/ADU	RNOISE
2	2048	2080	1008.0	16300.0	217.99	2.00	11.00	2.30
10990	1089.709	1161.562	14.265	13.719	12.971	12.749	...	
	1088.784	16.77	0.00	0.004	0.003	0.002	0.002	...
10981	1086.703	1160.681	13.069	12.964	12.797	12.748	...	
	1088.344	16.50	0.00	0.002	0.002	0.002	0.002	...
5786	393.794	618.794	13.912	13.806	13.356	12.797	...	
	1092.831	22.89	0.00	0.004	0.004	0.004	0.003	...
...								

První tři řádky souboru obsahují informace o původním snímku. Poté se v „třířádkové periodě“ opakují hodnoty, získané pro jednotlivé hvězdy. První řádek „periody“ vždy obsahuje postupně číslo hvězdy (pořadí, v jakém byla detekována), souřadnice X a Y na snímku (v pixelech) a vypočítané relativní hvězdné velikosti v jednotlivých aperturách. Druhý řádek pak obsahuje hodnotu „pozadí“ a jeho chyby (v ADU), parametr „skew“ (třetí moment) Gaussova rozdělení a vypočítané statistické odchylky hodnoty relativní hvězdné velikosti, uvedené ve stejném sloupci o řádek výše. Pokud se v některém sloupci objeví jako hodnota rel. hvězdné velikosti číslo 99.999, znamená to, že rel. hvězdnou velikost nebylo možné v dané apertuře zjistit.

Program munipack se nakonec skvěle osvědčil a fungoval výborně bez potřeby jakékoliv úpravy. Jediným omezením je použití výhradně aperturní fotometrie, které je ale na druhou stranu výhodné z hlediska rychlosti výpočtu, což byl v tomto případě velmi důležitý parametr.

Detekce objektů na všech 359 snímcích (každý má velikost 8,5 MB), vybraných pro další zpracování, tak trvala na počítači s procesorem Intel Celeron 566 MHz několik hodin. Na každém snímku přitom bylo nalezeno a fotometricky proměřeno maximálně asi 20000 objektů.

4.5 Identifikace objektů na snímcích

V dalším kroku bylo potřeba navzájem „zidentifikovat“ získané .SRT soubory, jinak řečeno zjistit, které hvězdy (řádky) z jednotlivých .SRT souborů si navzájem odpovídají. Je samozřejmé, že v návaznosti na předchozí zpracování bylo využito dalšího programu, patřícího do balíku „munipack“ – utilitu „munimatch“.

Bohužel, ukázalo se, že toto je nejslabší článek celé sekvence. Program byl obrazem potřeb v době svého vzniku - dokázal pracovat s několika desítkami, maximálně stovkami objektů v zorném poli a vzhledem k tomu byl optimalizován spíše na malé paměťové nároky než na výpočetní rychlost. K tomu, aby vůbec mohl fungovat s tak vysokým počtem hvězd, bylo potřeba zvětšit alokace proměnných. Nicméně i potom byl program velmi pomalý, ke zpracování celého souboru snímků by bylo potřeba několik dnů, možná desítek dnů. Díky rychlosti a obětavosti autora programu Filipa Hrocha však byla provedena pohotová optimalizace klíčových algoritmů a program „munimatch“ tak začal být, i když s jistými omezeními, plně funkční.

Program „munimatch“ se pokouší zidentifikovat jednotlivá pole tím, že hledá mezi hvězdami v obou polích podobné trojúhelníky. Pokud najde transformaci, jeden ze snímků je brán jako katalog a hvězdy, v něm obsažené, jsou vyhledávány i v druhém snímku. Výsledkem je pak soubor s příponou „.MAT“, který má formálně stejnou strukturu jako soubor „.SRT“, ale na řádcích se v něm vyskytují hvězdy druhého snímku, odpovídající hvězdám na stejných číslech řádků v „katalogovém“ SRT souboru. Přesný algoritmus hledání transformace je popsán v dokumentaci balíku munipack [13].

Proces, prováděný programem „munimatch“, je konfigurován pomocí položek v souboru „match.opt“ Při aplikaci na data ROTSE-I vypadal obsah souboru takto:

```
Maximum read stars      = 40
Max. identification stars = 5
Sigma clipping factor    = 2.0
Watch progress           = 0
Blank lines               = 1
```

První parametr je počet hvězd ze vstupních souborů, který se navzájem porovnává. „Sigma clipping factor“ je odchylka vzdálenosti, jaká je po zjištění transformace ještě povolena pro předpovězenou a skutečnou polohu hvězdy, aby byly prohlášeny za identické. Ostatní parametry nejsou příliš důležité a jejich funkce je rovněž zevrubně popsána v dokumentaci balíku munipack [13].

I přes veškeré úpravy byla nakonec funkce programu poměrně nespolehlivá, v relativně velkém počtu případů docházelo dokonce k nesprávnému zjištění transformace a následně i chybné identifikaci. Tyto „chyby“ se však naštěstí daly snadno detekovat, neboť program během své práce vypisuje mimo jiné i tabulku transformace včetně zjištěného „zvětšení“. Chybně vypočítané transformace mají obvykle tuto hodnotu velmi rozdílnou od 1.0, takže posouzení „kvality“ identifikace spočívalo v testu hodnoty jednoho čísla.

Problémy s chybně zjištěnou transformací zřejmě souvisejí s malým počtem srovnávaných objektů v porovnání s jejich celkovým množstvím. Seřazením objektů podle jasnosti, které „vybírá“ mezi první srovnávané stále ty nejjasnější (ovšem „nepřeexponované“!) hvězdy, zdá se uspokojivě nefunguje. Pravděpodobně by pomohlo výrazné zvýšení počtu srovnávaných hvězd, ale vzhledem k velmi rychlému růstu časové náročnosti s jejich počtem toto není, alespoň u současné verze programu, reálné.

V daném případě byl nakonec problém uspokojivě vyřešen opakovaným aplikováním programu „munimatch“ na dosud nezidentifikované objekty při postupném zvyšování hodnoty parametru „Maximum read stars“. Při koncové hodnotě „70“, při které už výpočet trval několik desítek hodin, bylo dosaženo stavu, kdy bylo správně identifikováno celkem 273 snímků. Tento počet jsem za dané situace uznal jako dostačující.

4.6 Fotometrická kalibrace

Aby bylo možné provést kalibraci, popsanou v kapitole 2.6, musíme nejprve navázat detekované hvězdy na jejich katalogové ekvivalenty. K tomuto účelu jsem se rozhodl použít zdrojový kód programu munimatch a upravit ho tak, aby byl schopen po vložení známé transformace provést identifikaci objektů z katalogu s odpovídajícími objekty na snímku. Problém se ukázal být poněkud složitější, neboť objekty v katalogu byly lokalizovány pomocí úhlových souřadnic - ekvatoreálních souřadnic 2. druhu, zatímco „obraz“ na snímku je jejich tangenciální projekcí. Po započítání této projekce (s využitím knihovny „slalib“ [18]) vše fungovalo tak, jak mělo.

Potřebnou část katalogu TYCHO-2, pokrývající zorné pole snímků, jsem získal díky službě Vizier na WWW stránkách CDS Strasbourg [11]. Tato služba umožňuje získání katalogu v různých formátech, mimo jiné i ve formátu, které používají programy Skycat/GAIA [15]. Díky tomu jsem byl schopen manuálně (pomocí programu GAIA) zjistit transformaci souřadnic mezi snímkem (který při identifikaci objektů sloužil jako referenční snímek pro ostatní snímky) a katalogem. Tento výsledek byl následně použit užitkou,

popsanou na začátku kapitoly. Výsledkem je pak „referenční“ soubor, jehož řádky obsahují 2 čísla: číslo řádku katalogu a jemu odpovídající číslo hvězdy v „MAT“ souboru.

Aby byly minimalizovány nepřesnosti, způsobené interakcí více hvězd v jedné apertuře, z referenčních hvězd byly dále obsaženy všechny hvězdy, v jejichž těsné blízkosti se na snímku nebo v katalogu nachází jiný objekt.

Tímto způsobem jsem zjistil, že na jednom snímku se vyskytuje přibližně 750 referenčních hvězd, které jsou součástí katalogu TYCHO-2.

Následné vytvoření souboru, kde je pro jednotlivé hvězdy v katalogu, nalezené též na daném snímku, uvedena kromě „katalogových“ hodnot relativní hvězdné velikosti ve standardních fotometrických filtrech B a V i předpokládaná hodnota změřené rel. hvězdné velikosti (vypočítaná ze vztahu 3.1) spolu se skutečně změřenou rel. hvězdnou velikostí (ve vybrané nejvhodnější apertuře č.3), je pouze záležitostí několika jednoduchých skriptů. Takovýto soubor je třeba vytvořit pro každý „SRT“ soubor zvlášť, a proto jsem jim „vyhradil“ vlastní souborovou příponu „.ref“.

V této chvíli pak konečně nastává situace, kdy je vše připraveno pro fotometrickou kalibraci.

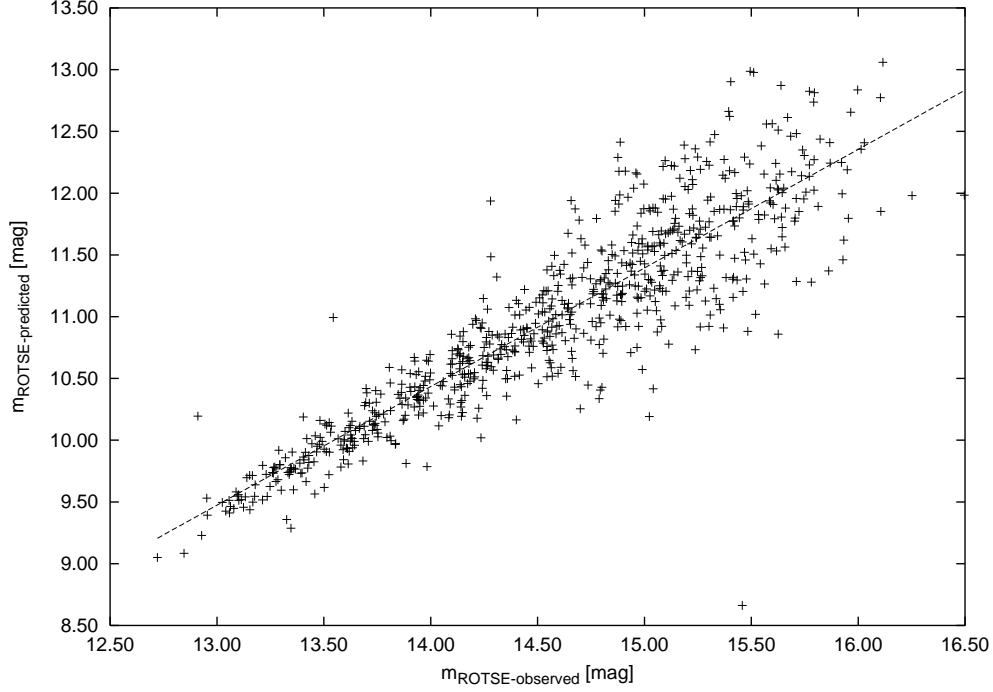
Prvním krokem by mělo být správné „naškálování“ stupnice měřených hvězdných velikostí. Toto se provede sestrojením grafu závislosti vypočítané rel. hvězdné velikosti (z katalogových hodnot) v závislosti na změřené rel. hvězdné velikosti. Proložíme-li grafem přímkou, její směrnice udává koeficient, kterým je třeba změřené hodnoty vynásobit. Příklad takového grafu, sestrojeného pro snímek „981217_sky0054_1b001“, je na obrázku 4.4.

Pro určení vlastního škálovacího koeficientu jsem vybral 10 snímků, u kterých jsem lineární regresí zjistil směrnici proložené přímkou. Výsledek jsem pak statisticky zpracoval, takže jsem získal hodnotu $a = 0.9604 \pm 0.0058$. Následně jsem pak tuto hodnotu aplikoval na všechny dále zpracovávané změřené rel. hvězdné velikosti, čímž bylo dosaženo správného „naškálování“ jejich stupnice, takže byl tento problém uspokojivě vyřešen a dále nebude třeba se jím zabývat.

Dalším krokem v kalibraci by mělo být „nastavení nulové hodnoty“. Stupnice měřených rel. hvězdných velikostí je prostě „posunutá“ vůči reálným hodnotám. Pokud bychom předpokládali konstantní extinkci v celém snímku, mohli bychom najít parametr b takový, že

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (m_{predicted} - m_{observed})_i}{n} \quad (4.1)$$

kde n je počet katalogových referenčních hvězd na snímku a hodnota rozdílu vypočítané (ze vztahu 3.1) a změřené rel. hvězdné velikosti se počítá pro každou ref. hvězdu i . Skutečnou (ve smyslu okalibrovanou) rel. hvězdnou



Obrázek 4.4: Graf závislosti vypočítaných rel. hvězdných velikostí na změřených rel. hvězdných velikostech jednotlivých referenčních hvězd pro snímek „981217_sky0054.1b001“. Směrnice proložené přímkou udává škálovací koeficient.

nou velikost libovolné hvězdy na snímku bychom získali z původně změřené hodnoty $m_{observed}$ jednoduchou rovnicí

$$m_{real} = m_{observed} + b \quad (4.2)$$

Obecně je ale extinkce ve snímku proměnná a místo rovnice 4.2 musíme uvažovat obecný vztah

$$m_{real} = m_{observed} + e(x, y) \quad (4.3)$$

Funkce $e(x, y)$ je (stejně, jako parametr b) proměnná v čase a je tedy nutné brát ji pro každý snímek zvlášť. Při malém zorném poli ji lze aproximovat jednoduchou funkcí, případně dokonce hodnotou konstantního parametru b .

Zorné pole jedné CCD kamery projektu ROTSE má velikost $8^\circ \times 8^\circ$. Toto je vzdálenost, na které již změna atmosférická extinkce zřejmě není zanedbatelná.

Provedl jsem několik pokusů, kdy jsem se pokoušel aproximovat funkci

$e(x, y)$ lineární a poté i kvadratickou funkcí. Výsledky ale byly nevalné a spíše jenom zvyšovaly šum.

Problém jsem nakonec vyřešil „lokalizací“: kalibrace je prováděna zvlášť pro každý objekt, u kterého je třeba změřit fotometrické veličiny. K této kalibraci je použito pouze referenčních hvězd, které se vyskytují v malém kruhovém okolí tohoto objektu. Poloměr je vybrán tak, aby do okolí spadalo přibližně 100 referenčních hvězd, což je stále dostatečné množství pro kvalitní statistické zpracování. Díky takto vzniklému poměrně malému poli a díky skutečnosti, že potřebná kalibrace se vztahuje k jeho středu, pak mohla být kalibrace počítána prostým aritmetickým průměrem podle vztahu 4.1. Výpočet byl doplněn i statistickým zpracováním odchylky hodnoty b , která bude dále započítávána do celkové chyby naměřených jednotlivých relativních hvězdných velikostí.

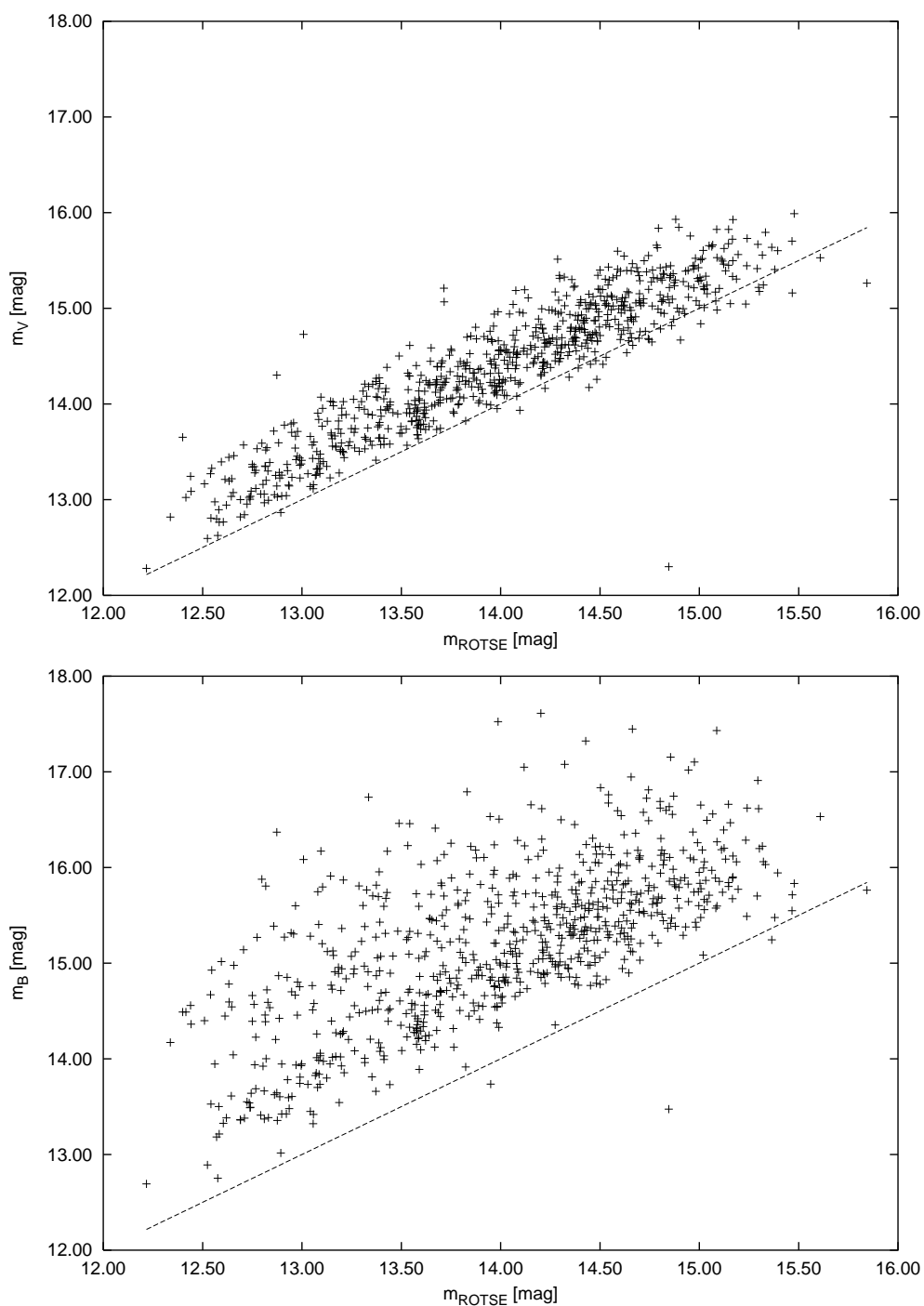
Velký soubor referenčních hvězd v zorném poli umožňuje i vizuální ověření správnosti vztahu 3.1. Na obrázcích 4.5 a 4.6 jsou grafy, znázorňující u jednotlivých referenčních hvězd na snímku „981217_sky0054_1b001“ hodnoty katalogových rel. hvězdných velikostí ve standardních filtrech B, V a z nich vztahem 3.1 vypočítané očekávané rel. hvězdné velikosti v závislosti na skutečně změřené rel. hvězdné velikosti. V grafech jsou vyneseny všechny referenční hvězdy, obsažené na snímku. Kalibrace změřených rel. hvězdných velikostí byla provedena pouze přibližně, použitím vztahu 4.1 na kompletní soubor referenčních hvězd. Pro přehlednost mají všechny tři grafy stejné měřítko na osách a ve všech je vynesena i přímková závislost $y = x$.

4.7 Získání světelných křivek

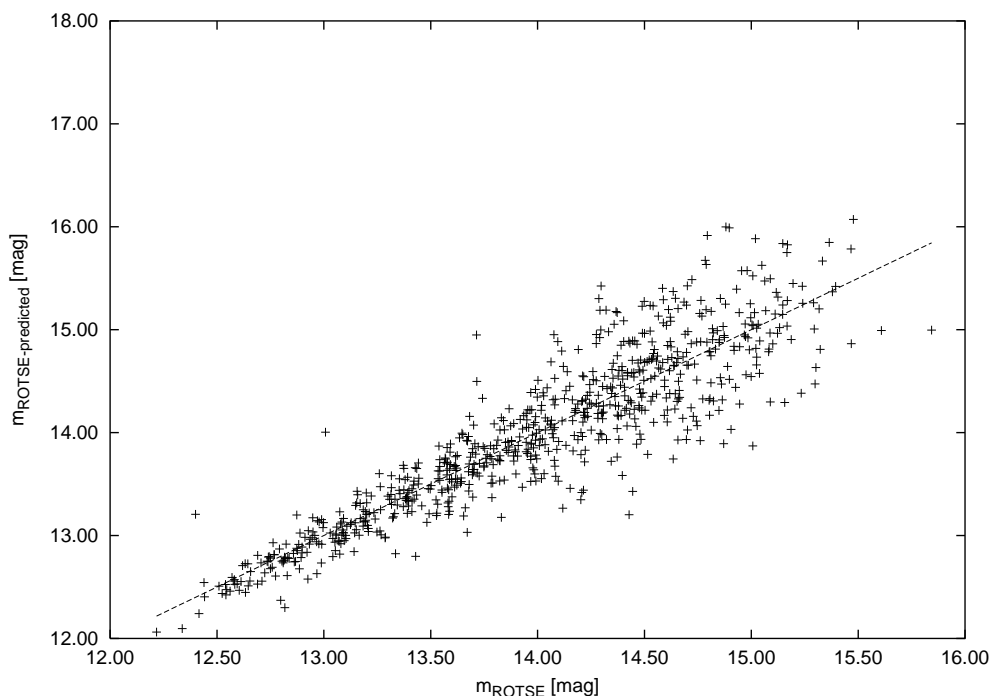
Nyní se pokusím stručně shrnout celý proces, vedoucí k získání světelných křivek. Veškeré zpracování jsem se pokoušel co nejvíce zautomatizovat, takže nyní je snadno opakovatelné a jeho provedení sestává z jednoduchého spuštění sekvence samočinných „shell“ skriptů.

Skripty předpokládají, že snímky (.fit soubory) a k nim příslušná zredukovaná, zpracovaná a zidentifikovaná data (.MAT soubory) jsou v obvyklých adresářích. Předpokládají dále existenci vybraného katalogového snímku „cat.SRT“, který byl použit při identifikaci polí, dále pak existenci souboru „tycho2.cat“, což je lokálně vytvořený katalog, obsahující vybrané hvězdy katalogu TYCHO-2, a potom soubor „cat_tycho.reference“, který obsahuje informace o spojení obou souborů.

Křivky jsou pro jednotlivé objekty získávány individuálně a pro každý z objektů tedy existuje zcela ekvivalentní sada skriptů. Sekvence skriptů vypadá takto:



Obrázek 4.5: Grafy závislosti katalogových rel. hvězdných velikostí ve standardních filtrech V, B na změřené rel. hvězdné velikosti jednotlivých referenčních hvězd pro snímek „981217_sky0054.1b001“. Znázorněná přímka je lineární závislost $y=x$.



Obrázek 4.6: Graf závislosti ze vztahu 3.1 vypočítaných rel. hvězdných velikostí na změřené rel. hvězdné velikosti jednotlivých referenčních hvězd pro snímek „981217_sky0054.1b001“. Znázorněná přímka je lineární závislost $y=x$.

- „makeRefStarsDifsCompleteScript“ – Skript „přebere“ všechny „.MAT“ soubory v obvyklých umístěních. Pro každý z nich vytvoří voláním dalšího skriptu „makeRefStarsDifs“ soubor „.ref“, obsahující veškeré potřebné informace o referenčních hvězdách, obsažených na daném snímku. Tento soubor pak dále přebere a vybere z něj pouze referenční hvězdy, spadající do předem definovaného okolí studované hvězdy. Z těchto vybraných hvězd pak zavoláním skriptu „makeRefStarsDifsMean“ vypočítá hodnotu kalibračního parametru b včetně její statistické odchylky a obě čísla uloží do souboru s příponou „.ref.mean“.
- „surveyMAT_with_ref_mean-All_script“ – Tento skript postupně ve všech adresářích, obvykle obsahujících „.MAT“ soubory, spustí skript „surveyMAT_with_ref_mean“. Tento skript se pak již postará o vše ostatní: přebere všechny „.MAT“ soubory v daném adresáři a získá z nich informace o požadovaných hvězdách, které pak uloží, spolu s informací o kalibraci ze souborů „.ref.mean“ a okamžikem pořízení snímku z hlavičky

odpovídajícího „fit“ souboru, do jediného souboru „actual.survey“.

Výsledkem je tedy zmíněný soubor „actual.survey“, ve kterém jsou na řádcích uloženy informace ze všech snímků. Na každém řádku jsou ve sloupcích umístěny následující informace:

- Juliánské datum pořízení snímku
- Dvojice nezkalibrovaná rel. hvězdná velikost a její odchylka – těchto dvojic je na každém řádku větší množství, týkají se kromě sledovaného objektu i dalších, testovacích hvězd.
- Hodnotu kalibračního parametru b , statistickou odchylku referenčních hvězd a odchylku parametru b .

Zpracování dat tím končí, zbytek je pouze záležitostí vhodného zobrazení dat, obsažených v tomto souboru. Zobrazovaná rel. hvězdná velikost je kalibrována parametrem b podle vzorce 4.2. Směrodatná odchylka takto získané rel. hvězdné velikosti je pro každý bod v grafu počítána jako chyba nepřímého měření, definovaného vztahem 4.2, a je tedy odvozována z chyb veličin, do vztahu 4.2 vstupujících, vztahem

$$\sigma_{m_{ROTSE}} = \sqrt{\sigma_{m_0}^2 + \sigma_b^2}, \quad (4.4)$$

kde σ_{m_0} je odchylka „nezkalibrované“ rel. hvězdné velikosti, vypočítaná programem „muniphot“, σ_b je směrodatná odchylka parametru b a $\sigma_{m_{ROTSE}}$ je požadovaná výsledná směrodatná odchylka „okalkulované“ hodnoty rel. hvězdné velikosti.

K vytvoření veškerých grafů jsem použil program „Gnuplot“.

Kapitola 5

Aplikace, fyzikální výsledky

5.1 Obecně

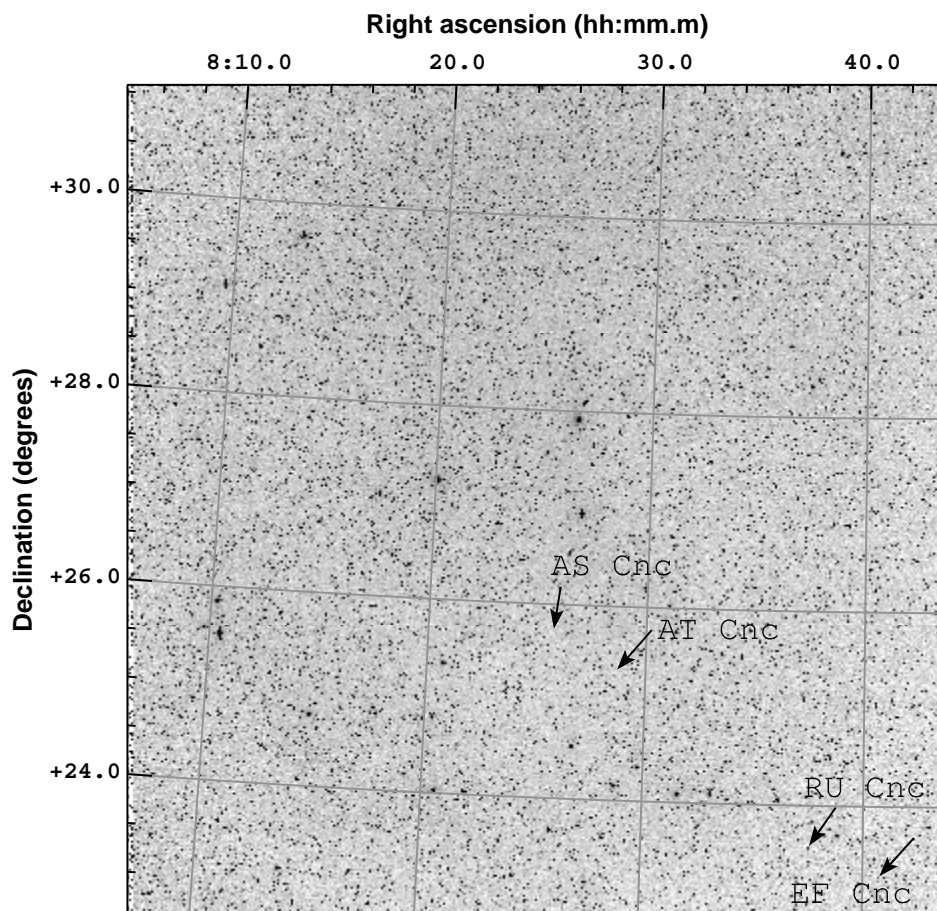
Hlavním cílem celé práce nebylo získat konkrétní fyzikální výsledky, ale spíše navrhnout a ověřit metodiku celého zpracování WF („Wide-Field“, velkoplošných) snímků, zmapovat jejich výhody i nevýhody a otestovat možnosti jejich využití na některých konkrétních fyzikálních objektech. Těmto objektům, tedy jejich základní charakteristice a z mojí analýzy vytěženým výsledkům, je věnována celá tato kapitola.

Umístění všech studovaných objektů v zorném poli č. 54b je znázorněno na obrázku 5.1. Všechny hodnoty rel. hvězdné velikosti jsou měřeny bez standardních fotometrických filtrů a mají vlastnosti, popsané v kapitole 3.4.

5.2 AS Cnc

Proměnná hvězda AS Cnc je zástupce skupiny pulzujících proměnných hvězd typu RR Lyr, konkrétně tedy podtypu RRab. Jeho základní charakteristiky, uvedené v GCVS (General Catalog of Variable Stars) [11] jsou:

- Souřadnice (ekvinokcium 2000): $\alpha = 08^{\text{h}} 25^{\text{m}} 43.9^{\text{s}}$, $\delta = +25^{\circ} 43' 58''$
- Typ proměnnosti: RRAB
- Rozsah relativních hvězdných velikostí (fotografická emulze): 11.9 – 13.0 mag.
- Základní okamžik maximální jasnosti (Juliánské datum): 2439200.4060 dnů
- Perioda: 0.617520 dnů



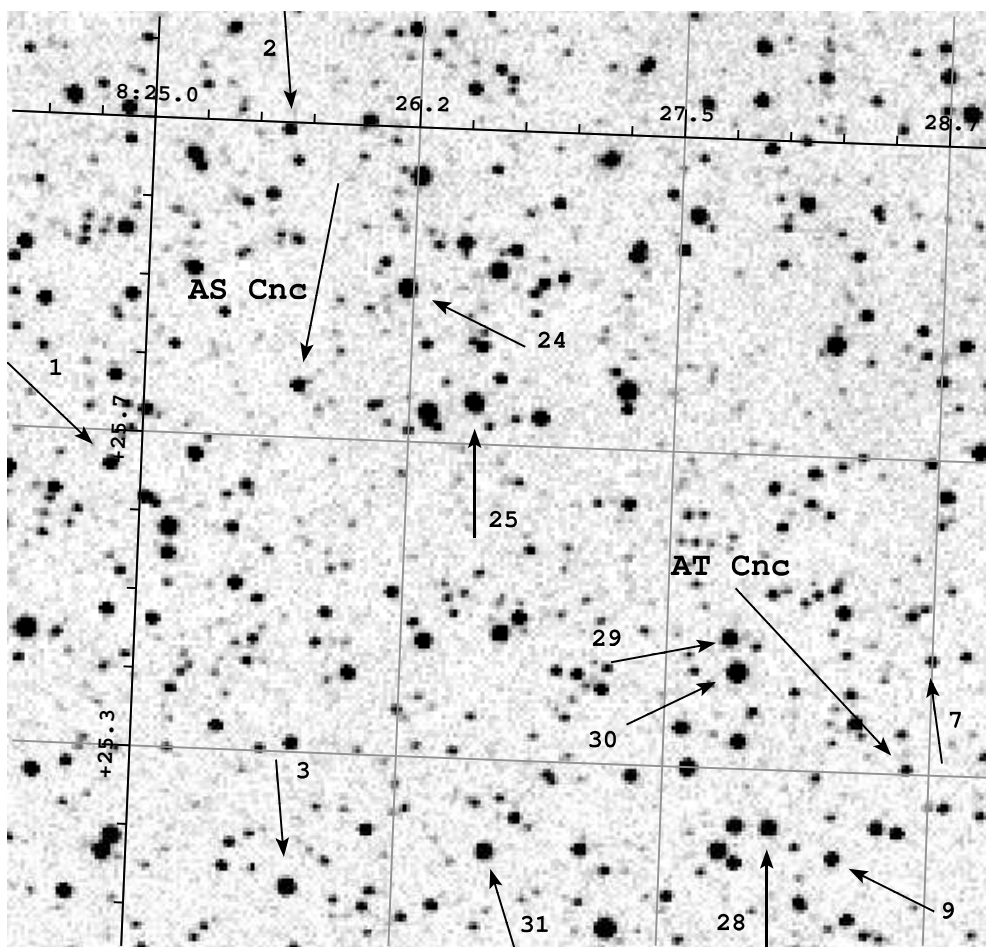
Obrázek 5.1: Zorné pole 54b s vyznačením poloh studovaných hvězd.

Celkově se jedná o objekt velmi málo studovaný, databáze NASA ADS [12] obsahuje jenom asi 10 článků s jeho citací, ze kterých se navíc většina zabývá pouze hromadnou studií hvězd typu RR Lyr.

Pozice hvězdy na snímku přístroje ROTSE-I je patrná z obrázků 5.1 a 5.2.

Změřená světelná křivka hvězdy, vzniklá skládáním bodů do známé periody z GCVS, je vynesena v grafu na obrázku 5.4.

Hodnota periody $P = 0.61752$ dne, uvedená v GCVS, odpovídá realitě. To už ale neplatí pro hodnotu základního okamžiku maximální jasnosti hvězdy, uvedenou na stejném místě (Odchylka činí asi 0.4 hodnoty periody). Správnou hodnotu jsem stanovil hrubým odhadem (bez podrobné analýzy) jako $JD_0 = (2451150.40 \pm 0.01)$ dnů.



Obrázek 5.2: Těsné okolí hvězd AS Cnc a AT Cnc na snímku ROTSE, pole 54b. Kromě těchto hvězd jsou na snímku označeny i neproměnné objekty, které byly vybrány pro testování kvality fotometrického měření.

5.3 AT Cnc

Proměnná hvězda AT Cnc patří do skupiny eruptivních proměnných hvězd. Konkrétně se jedná o trpasličí novu, typ Z Camelopardalis. V GCVS je pro ni uvedeno:

- Souřadnice (ekvinokcium 2000): $\alpha = 08^{\text{h}} 28^{\text{m}} 14.2^{\text{s}}$, $\delta = +25^{\circ} 21' 01''$
- Typ proměnnosti: UG:
- Rozsah relativních hvězdných velikostí (fotografická emulze): 12.3 – 14.6 mag.

Na hvězdu AT Cnc je v NASA ADS obsaženo 34 odkazů.

Poloha hvězdy na snímku přístroje ROTSE-I a její těsné okolí je znázorněna na obrázcích 5.1 a 5.2.

Světelnou křivku, získanou zpracováním snímků projektu ROTSE, lze zhlédnout na obrázku 5.5.

Body na křivce pocházejí ze snímků, pořízených v období květen 1998 – červenec 2000, jejich výskyt je však omezen na období pozorovatelnosti v zimních měsících, vzhledem k poloze zorného pole a umístění dalekohledu.

5.4 EF Cnc

Hvězda EF Cnc je periodickou proměnnou hvězdou. V katalogu GCVS je klasifikována jako typ W UMa. Toto zařazení je však pravděpodobně chybné, v článku IBVS No.5113 [4] je provedena analýza dat, svědčící o příslušnosti k hvězdám typu RR Lyr, konkrétně RRc.

V katalogu GCVS jsou o hvězdě EF Cnc uvedena data:

- Souřadnice (ekvinokcium 2000): $\alpha = 08^h 40^m 37.9^s$, $\delta = +23^\circ 16' 07''$
- Typ proměnnosti: EW
- Rozsah relativních hvězdných velikostí (fotografická emulze): 11.7 – 12.4 mag.

Na hvězdu EF Cnc je v NASA ADS obsaženo pouze 5 odkazů na články.

Umístění hvězdy v zorném poli je patrné na obrázcích 5.1 a 5.3

Zmíněný článek IBVS No.5113 [4] dále uvádí zjištěné hodnoty periody a základního okamžiku maxima jasnosti

$$P = (0.2956885 \pm 0.0000036) \text{ dn}$$

$$JD_0 = (2451955.529 \pm 0.004) \text{ dn} .$$

Tyto hodnoty byly pořízeny analýzou snímků ze čtyř nocí v únoru, dubnu a květnu roku 2001.

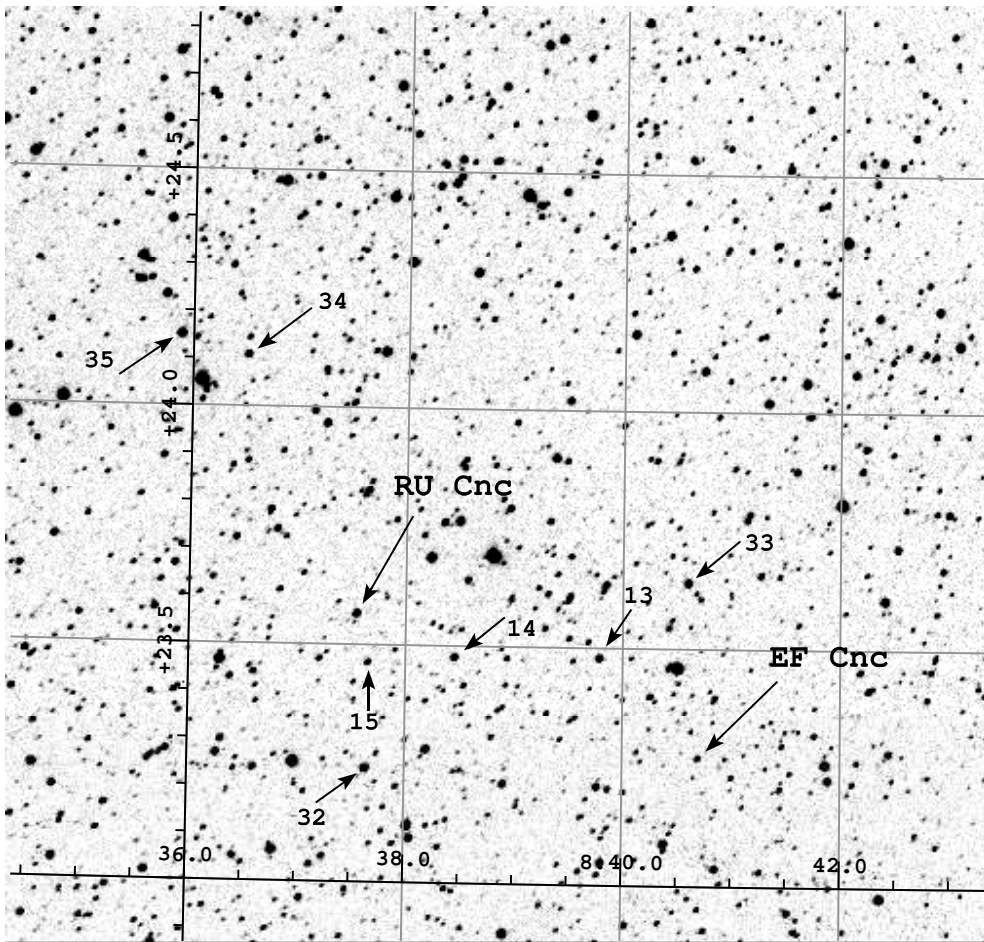
Moje analýza snímků, pořízených v období květen 1998 – červenec 2000 projektem ROTSE, však vykazovala poněkud jiné parametry:

$$P = (0.295779 \pm 0.000004) \text{ dn}$$

$$JD_0 = (2451150.203 \pm 0.005) \text{ dn} .$$

Hodnotu periody i její odchylku odvodil podrobnou analýzou dat Martin Jelínek.

Světelná křivka, vzniklá skládáním podle zjištěné periody, je zobrazena v grafu na obrázku 5.6.



Obrázek 5.3: Těsné okolí hvězd EF Cnc a RU Cnc na snímku ROTSE, pole 54b.

5.5 RU Cnc

RU Cnc je aktivní zákrytová dvojhvězda typu RS CVn.

V katalogu GCVS jsou o ní obsaženy tyto informace:

- Souřadnice (ekvinokcium 2000): $\alpha = 08^{\text{h}} 37^{\text{m}} 30.5^{\text{s}}$, $\delta = +23^{\circ} 33' 47''$
- Typ proměnnosti: EA/DS/RS
- Rozsah relativních hvězdných velikostí (filtr V): 10.10 – 11.25 mag.
- Základní okamžik minima jasnosti (Juliánské datum): 2422650.72 dnů
- Perioda: 10.172988 dnů

Databáze NASA ADS obsahuje 69 odkazů na články, které se vztahují k RU Cnc.

Umístění hvězdy v zorném poli ukazují obrázky 5.1 a 5.3.

Perioda, uložená v katalogu GCVS je správná, základní okamžik minima jasnosti bylo třeba opravit na $JD_0 = (2451154.78 \pm 0.05)$ dn.

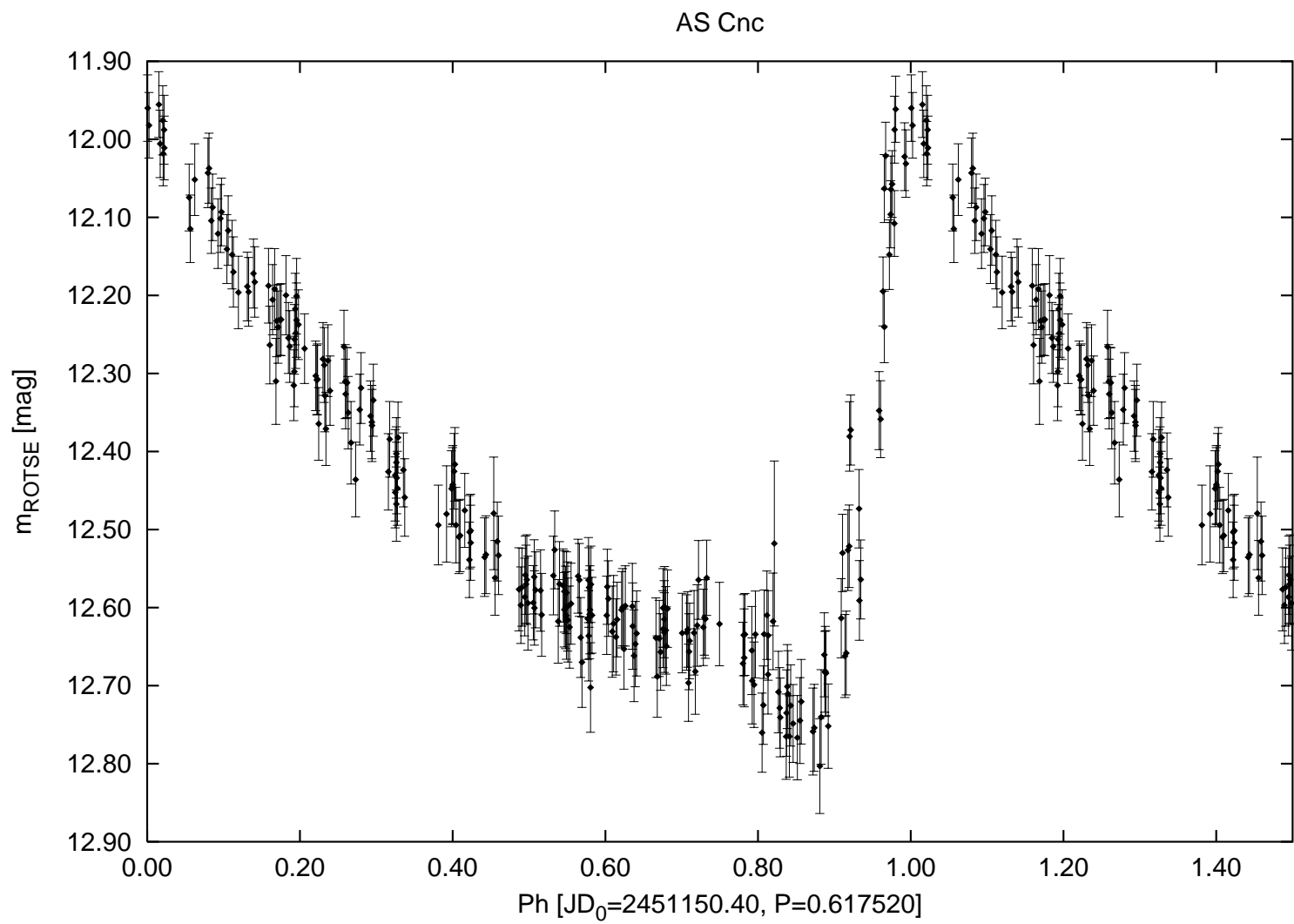
Fázová světelná křivka proměnné hvězdy RU Cnc je vynesena v grafu na obrázku 5.7.

Rozptyl v grafu okolo fáze 0.75 je patrně reálný a je způsoben skutečnými dlouhodobými změnami jasnosti v této fázi periody.

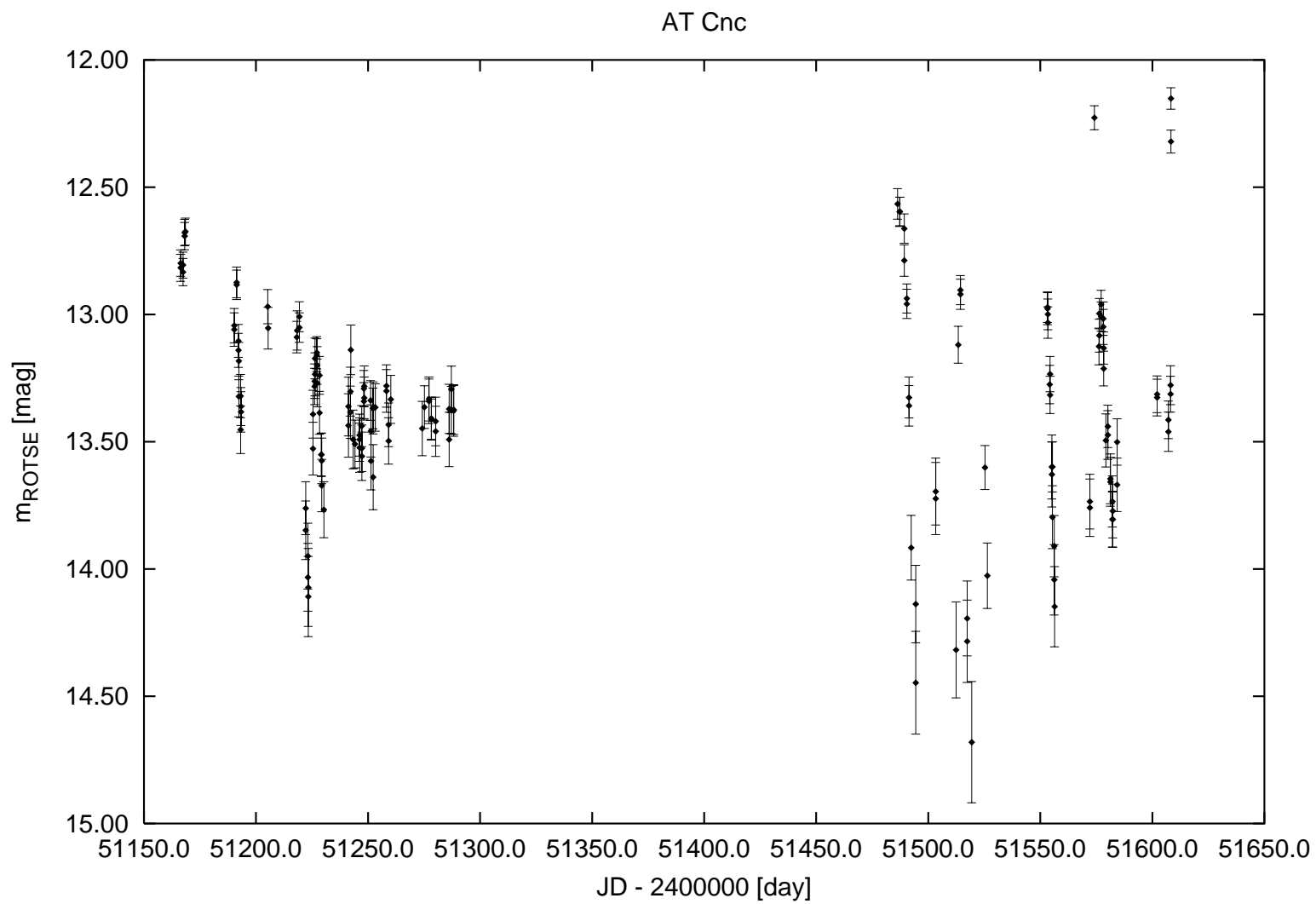
5.6 Test na neproměnných hvězdách

Zajímavým testem systému je získání „světelných křivek“ pro neproměnné hvězdy. Z rozptylu takových grafů kolem střední hodnoty lze totiž posuzovat rozptyl měření hodnot rel. hvězdných velikostí.

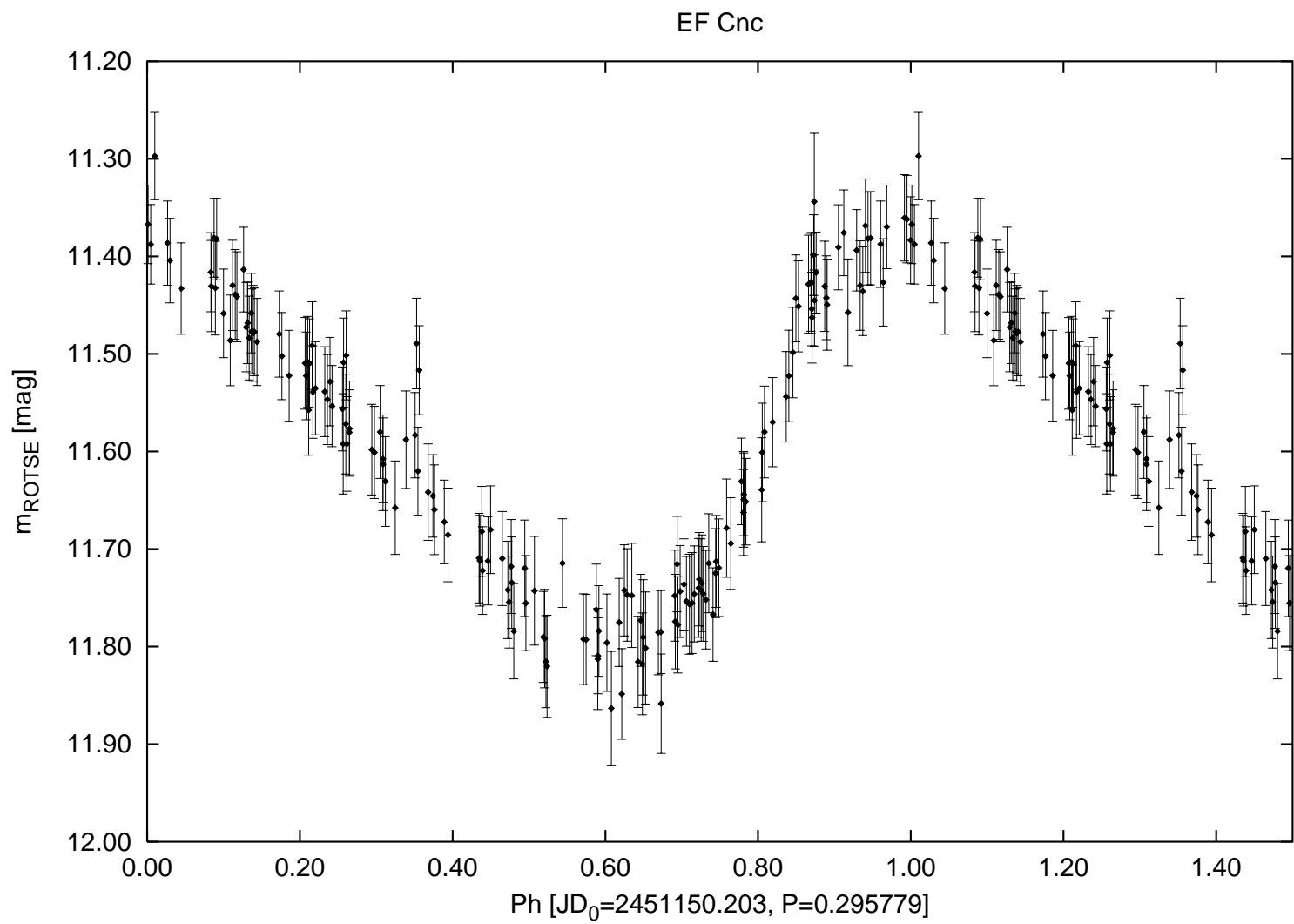
Světelné křivky čtyř konstantních hvězd jsou vyneseny v grafech na obrázku 5.8. Podle „čísla“ hvězdy, vyznačeného v grafu, lze najít její umístění v zorném poli na obrázcích 5.2 a 5.3.



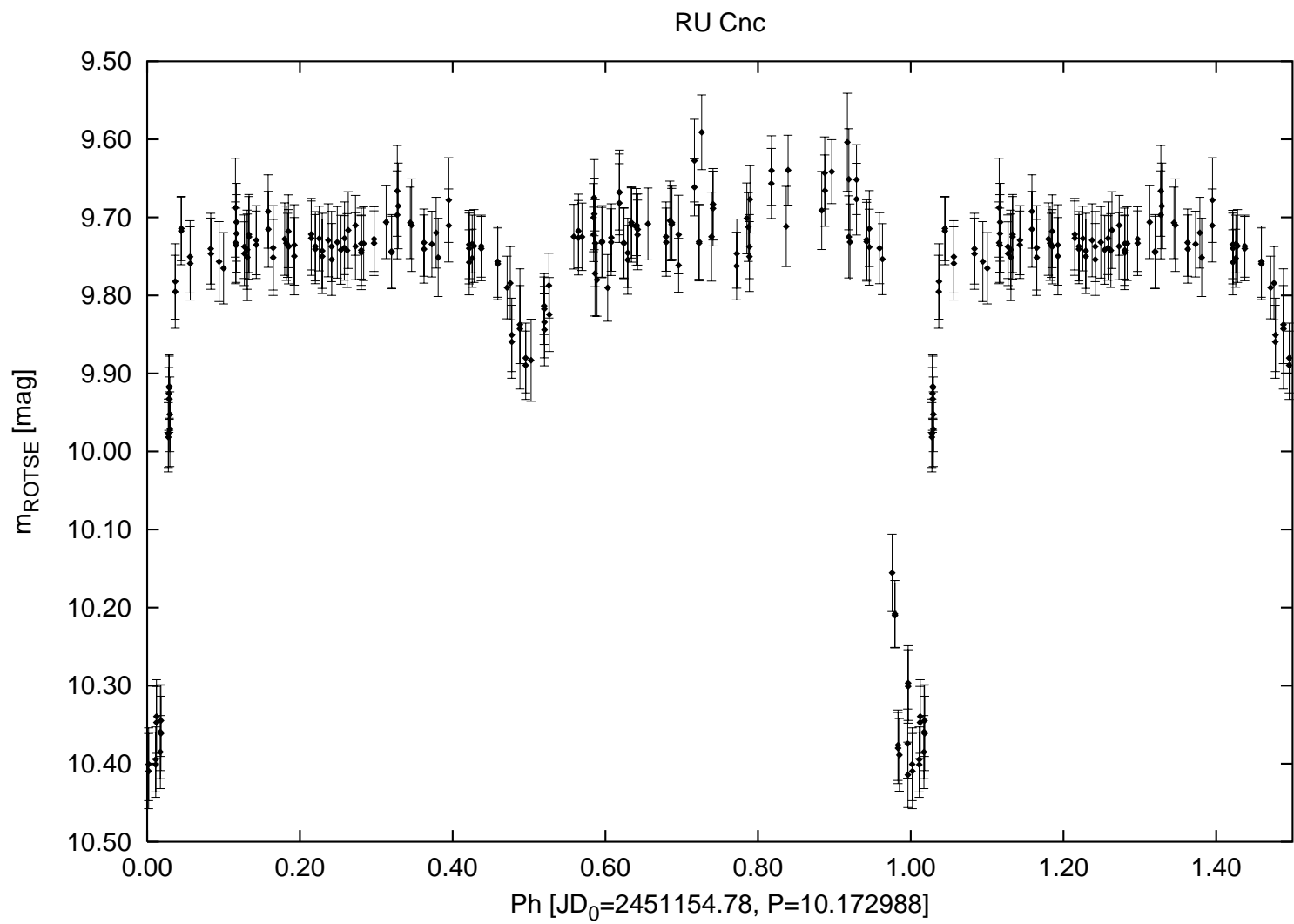
Obrázek 5.4: Graf světelné křivky proměnné hvězdy AS Cnc.



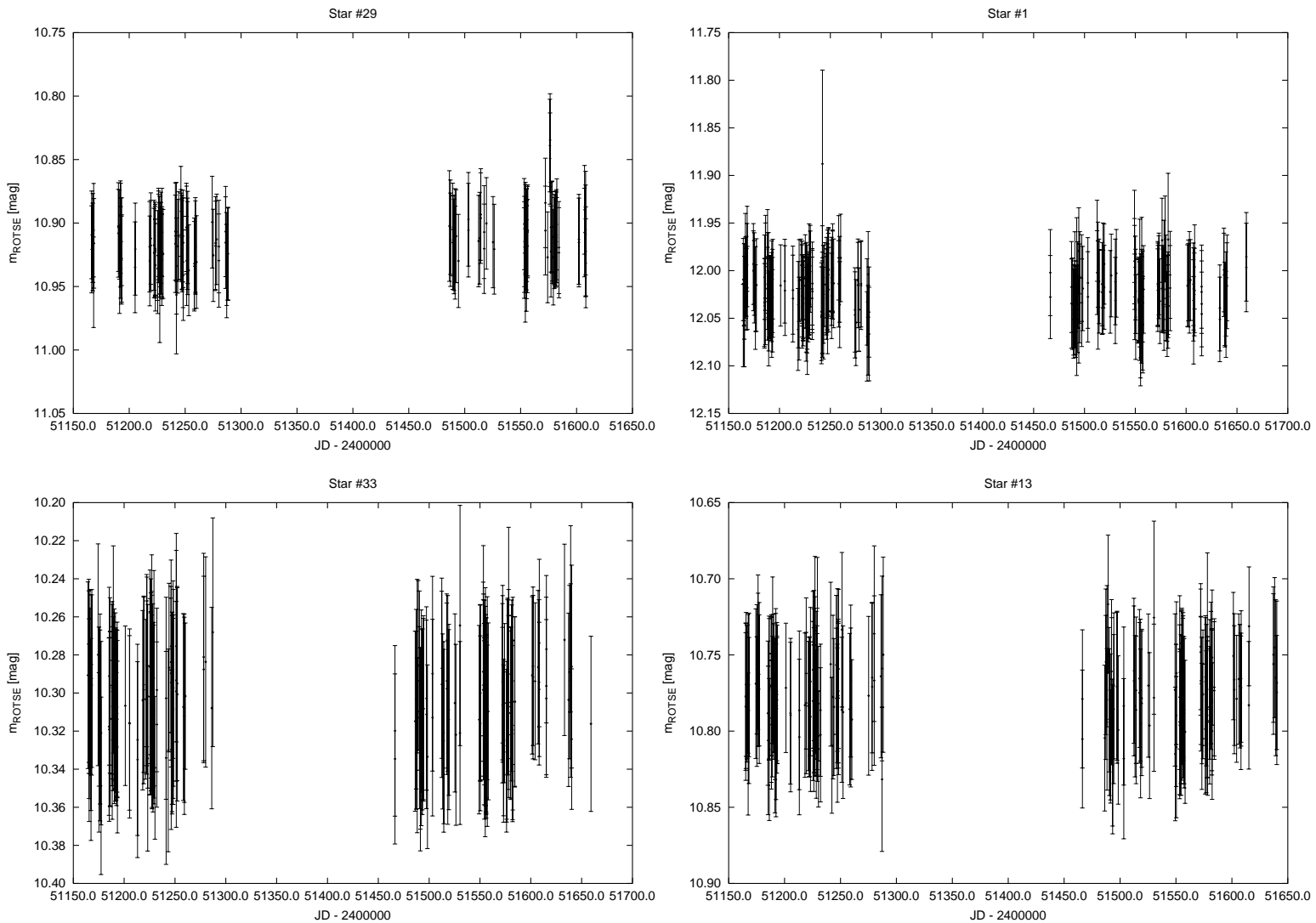
Obrázek 5.5: Graf světelné křivky proměnné hvězdy AT Cnc.



Obrázek 5.6: Graf světelné křivky proměnné hvězdy EF Cnc.



Obrázek 5.7: Graf světelné křivky proměnné hvězdy RU Cnc.



Obrázek 5.8: Grafy světelných křivek testovacích neproměnných hvězd.

Kapitola 6

Diskuse

Postup zpracování dat z pozorovacího systému ROTSE-I, popsaný v kapitole 4, se ukázal být úspěšný, přestože obsahoval některá slabá místa. Jedním z cílů této práce je najít a otestovat metodiku zpracování WF (Wide Field, velkoplošných) snímků, proto si v této části ještě jednotlivé problémy zopakujeme.

Obecně se dá říci, že základním jmenovatelem celého zpracování WF snímků je výpočetní čas a nároky na počítač vůbec. Na solidně vybaveném počítači s procesorem Intel Celeron 566 MHz s 576 MB paměti a s kapacitou 40 GB pevného disku trvalo kompletní zpracování jednoho snímku uvedeným způsobem až desítky minut. Přitom se zpracovávané pole číslo 54b nacházelo mimo oblast Mléčné dráhy, kde je v každém ze snímků detekováno, fotometricky proměřeno a dále zpracováváno až 20000 objektů. Existují ale i pole s mnohem větším počtem hvězd, například při testování bylo na snímku zorného pole číslo 44c detekováno až 60000 objektů.

Dalším velkým problémem zpracování WF snímků je velká plošná hustota detekovaných hvězd. To je totiž faktor, který velmi snižuje přesnost a spolehlivost použité aperturní fotometrické metody (viz kapitola 2.4). Problém se dá vyřešit použitím složitější metody fitování profilů, ovšem za cenu podstatně zvýšené výpočetní náročnosti a tedy i doby zpracování. Moje zpracování ale ukázalo oprávněnost použití aperturní metody, ovšem s omezením na jednotlivé, předem vybrané, na snímku dostatečně izolované objekty. Pro přesnou fotometrii obecně libovolné hvězdy na snímku (což je potřeba například pro automatické vyhledání nových proměnných objektů na snímku) se už ale přesnější a pomalejší metodě zřejmě nelze vyhnout, a to obzvláště v polích s velkou plošnou hustotou hvězd (například zmiňované pole číslo 44c).

Největším oříškem celého postupu byl proces identifikace objektů na snímcích programem munimatch (viz kapitola 2.5). Identifikace objektů byla poměrně nespolehlivá, přes veškerou snahu se podařilo zidentifikovat pouze asi

70% všech snímků. Toto je tedy poměrně velký problém a jeho řešení si jistě v budoucnu vyžádá podrobnou revizi funkčnosti celého programu, případně kompletní přepracování jeho algoritmů.

Zajímavou operací je kalibrace na referenční hvězdy. Velké zorné pole dává velký statistický soubor těchto hvězd, současně se však naskýtá problém proměnnosti atmosférické extinkce podél snímku. Vzhledem k účelu kalibrace, zaměřeného na získání světelné křivky jednoho vybraného objektu, se toto podařilo vyřešit postupem, popsáním v kapitole 4.6.

Jak dokazují grafy na obrázku 5.8, lze na snímcích projektu ROTSE-I změřit rel. hvězdnou velikost i u slabších objektů kolem 12. magnitudy s přesností na několik setin magnitudy. Grafy navíc prokazují dlouhodobou stabilitu přístroje a správnost zpracování dat. To se potvrdilo i při měření konkrétních proměnných objektů různých typů - viz grafy na obrázcích 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, kde je možné pro jasnosti kolem 12 mag považovat za reálné světelné změny kolem 0.1 mag. Tato konkrétní měření navíc ukázala, že je možné pomocí těchto dat jak monitorovat světelné změny dlouhodobě neperiodicky proměnných objektů, tak i skládáním zjišťovat parametry a jemné detaily světelných křivek periodicky proměnných objektů různých typů.

Kapitola 7

Závěr

Jak již bylo zmíněno v textu, předkládaná diplomová práce probíhala v rámci mezinárodní spolupráce a na základě upřesňujících se potřeb spolupracujících vědecké komunity. Tomuto začlenění práce odpovídala i operativní konkretizace a upřesnění řešených úkolů a problémů.

V první řadě šlo o prokázání vědecké hodnoty dat získávaných projektem ROTSE-I a jemu podobných robotických teleskopů, vyvinutých primárně pro účely studia kosmických záblesků gama v optickém oboru spektra. Ve druhé, neméně důležité řadě šlo o navržení a ověření vhodné metodiky zpracování dat z takovýchto přístrojů. Zde je třeba si uvědomit specifčnost širokoúhlých CCD monitorů a z toho plynoucí specifčnost zpracovávání i přenosu gigantického množství dat a v neposlední řadě pak i to, že šlo vpravdě o průkopnickou práci, tedy v podstatě o navržení a ověření cesty pro další vědecké pracovníky, používající data z projektu ROTSE-I či podobného CCD monitoru. Podle informace kolegů z týmu ROTSE šlo dokonce v případě této diplomové práce o historicky první poskytnutí části dat z experimentu zahraničnímu pracovišti.

Vědecká hodnota dat byla nepochybně prokázána vygenerovanými světelnými křivkami, jejichž ukázky i následná vědecká diskuse a analýza jsou v předchozích kapitolách této práce. Tyto výsledky jistě dobře dokazují i vhodnost navržené metodiky zde rovněž diskutované a popsané. Je ambicí této práce stát se vodítkem pro další badatele, těžící z bohaté zásoby archivních dat z experimentu ROTSE, a to v celém rozsahu – tedy od žádosti o poskytnutí dat (řádně vědecky zdůvodněné), až po přenos dat a jejich redukci, analýzu a interpretaci. O výsledky této práce má již nyní velký zájem řada zahraničních týmů, které potřebují získat dlouhodobá optická fotometrická data pro astrofyzikální objekty řady kategorií, např. AGN, zdrojů vysokých energií, Čerenkovských zdrojů atd.

Právě s ohledem na mezinárodní komunitu a jejich aktuální potřebu byla

práce soustředěna na generaci přesných světelných křivek vybraných objektů.

Jistě jde o revoluční změnu v oboru dlouhodobé fotometrie optických objektů. Až dosud jsme byli v tomto oboru totiž odkázáni buď na odhady vizuální, nebo na obtížnou generaci křivek z fotografických dat na skleněných deskách. Tato data však téměř nikdy nedosahovala četnosti měření, kterou vykazuje experiment ROTSE.

V této práci jsme se soustředili na vědeckou analýzu vybraných proměnných hvězd různých typů. Identické analýzy však lze snadno aplikovat i na jiné kategorie proměnných astrofyzikálních objektů, jako jsou například aktivní galaktická jádra ap.

Literatura

- [1] Hoffmeister C., Richter G., Wenzel W.: Veränderliche Sterne. Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1990, ISBN 3-335-00224-5.
- [2] Martinez P., Klotz A.: A practical guide to CCD astronomy. Cambridge University Press, 1998, ISBN 0-521-55950-4.
- [3] Akerlof, C. a kol.: ROTSE All Sky Surveys for Variable Stars I: Test Fields. ApJ, astro-ph/0001388, 2000.
- [4] Pejcha O., Sobotka P.: EF Cancri: a New RRc star. IBVS No.5113, 2001.
- [5] Někteřé výsledky Rotse Variable Survey I,
http://umaxp1.physics.lsa.umich.edu/~mckay/rsv1/rsv1_home.htm
- [6] Apogee Instruments Inc, <http://www.apogee-ccd.com/>
- [7] University of Michigan, <http://www.umich.edu/>
- [8] Los Alamos National Laboratory, <http://www.lanl.gov/external/index.html>
- [9] Lawrence Livermore National Laboratory, <http://www.llnl.gov/>
- [10] Projekt ROTSE, <http://www.umich.edu/~rotse/>
- [11] CDS Strasbourg, <http://cdsweb.u-strasbg.fr/>
- [12] The NASA Astrophysics Data System, <http://cdsads.u-strasbg.fr/>
- [13] Hroch F.: „munipack“, <http://www.ian.cz/munipack/>
- [14] Starlink Project: „ccdpack“, <http://www.starlink.rl.ac.uk/>
- [15] Starlink Project: „GAIA“, <http://www.starlink.rl.ac.uk/>
- [16] Starlink Project: „EXTRACTOR“, <http://www.starlink.rl.ac.uk/>

- [17] William D Pence, HEASARC, NASA/GSFC: „cfitsio“, <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/fitsio/fitsio.html>
- [18] Starlink Project: „slalib“, <http://www.starlink.rl.ac.uk/>

Použitý software

- Operační systém Red Hat Linux release 7.0, Kernel 2.2.18 a některé jeho standardní součásti, především pak:
 - GNU Bash-2.04
 - GNU Awk 3.0.6
 - Gnuplot, Linux version 3.7
 - gcc-2.96 (GNU project C and C++ Compiler)
- Balík na zpracování CCD dat „munipack“ (autor Filip Hroch)[13], především pak utility:
 - darkbat
 - flatbat
 - muniphot
 - munimatch
- Program „GAIA“ verze 2.4-1, Starlink Project[15]
- Knihovna „cfitsio“ verze 2.2, William D Pence, HEASARC, NASA/GSFC[17]
- Knihovna „slalib“ verze 2.4-5, Starlink Project[18]
- L^AT_EX česká distribuce, T_EX verze 3.14159

Příloha A

Výpis důležitých skriptů

A.1 Skript „makeRefStarsDifsCompleteScript“

```
#!/bin/sh
for dir in /diplomka/data/54b/0_excellent/MAT/ /diplomka/data/54b/1_nearly_excellent_slightly_worse_bgr/MAT/ \
/diplomka/data/54b/2_very_good_worse_bgr/MAT/ /diplomka/data/54b/3_good_quite_bad_bgr/MAT/ ;
do
    cd $dir;
    ls *.MAT | while read name; do
        if ! [ -s $name.ref ]; then
            /diplomka/data/scripts/AS/makeRefStarsDifs $name > $name.ref;
        fi

        cat ${name} | gawk '{
            if (i==5778) {
                if (NF >= 1) {
                    print $2, $3;
                } else {
                    print "na";
                }
                exit;
            }

            getline;
            getline;
            i++;
        }' > tmp-1234567890;

        read x y < tmp-1234567890;

        if [ $x != "na" ]; then
            cat $name.ref | awk '{
                if ( ((($2-$x')^2 + ($3-$y')^2) < 400^2) {
                    print $0
                }
            }' > $name.ref.AS
            wc -l $name.ref.AS
            /diplomka/data/scripts/AS/makeRefStarsDifsMean $name.ref.AS > $name.ref.mean.AS;
            echo ${name}" : done";
        else
            echo ${name}" : na";
        fi

        rm tmp-1234567890;
    done;
done;
```

A.2 Skript „makeRefStarsDifs“

```
#!/bin/sh
```

```

# Takze, tohle je skriptik, který slouží získání dat potřebných pro kalibraci,
# získává informace o referencních hvězdách (TYCHO2 katalog), které se
# vyskytují v SRT souboru a společně s informacemi z TYCHO2 je posílá na výstup.
# A přidá k nim i předpocítanou magnitudu pro ROTSE a rozdíl tehle a zmerené
# přístroje.
#
# Použít je 'makeRefStarsDifs soubor.SRT'. Na výstup jsou pak posílány data,
# kde je ve sloupcích pořadí: idSRT magSRT idTYCHO BTmag VTmag magROTSE
# magROTSE-magSRT .
#
# Vskera id jsou pouze lokální a nemají souvislost se skutečnými katalogy
# (kromě toho meho, samozřejmě :-))

if [ $# = 0 ] || [ $1 = "-h" ] || [ $1 = "--help" ]; then
    echo "usage: $0 <input-file.SRT> 1">&2
    exit 1
fi

if ! [ -s /diplomka/data/54b/cat/cat_tycho.reference.tmag ]; then
    cat /diplomka/data/54b/cat/cat_tycho.reference | gawk '{
        i=0;
        do {
            i++;
            pole[i,1]=$1;
            pole[i,2]=$2;
        } while(getline)
        N=i;

        close(FILENAME);

        while ("cat /diplomka/data/54b/cat/tycho/tycho2.cat" | getline) {
            for (i=1; i<=N; i++) {
                if (pole[i,2]==$1) {
                    pole[i,3]=$6;
                    pole[i,4]=$7;
                }
            }
        }

        close("cat /diplomka/data/54b/cat/tycho/tycho2.cat");
        OFS="\t";
        for (i=1; i<=N; i++) {
            print pole[i,1], pole[i,2], pole[i,3], pole[i,4]
        }
    }' >/diplomka/data/54b/cat/cat_tycho.reference.tmag
fi

cat /diplomka/data/54b/cat/cat_tycho.reference.tmag | gawk '{
    i=0;
    do {
        i++;
        pole[i,1]=$1;
        pole[i,8]=$2;
        pole[i,9]=$3;
        pole[i,10]=$4;
    } while(getline)
    N=i;

    j = 0;
    getline < "$1",
    for (i=1; i <= N; i++) {
        while (j < pole[i,1]) {
            getline < "$1",
            getline < "$1",
            getline < "$1",
            j++;
        }

        pole[i,2]=$2;
        pole[i,3]=$3;
        pole[i,4]=$5 * 0.96040065;
        pole[i,5]=$6 * 0.96040065;
        pole[i,6]=$7 * 0.96040065;
        pole[i,7]=$8 * 0.96040065;

        for (k=4; k<=7; k++) {
            if ( (pole[i,k] > "90.0") || (pole[i,k] == "") ){
                pole[i,k]="none";
            }
        }
    }
}'

```

```

    }
}

close("'${1}'");

OFS="\t";

print "id_cat", "x_cat" "\t", "y_cat" "\t", "m_ap2", "m_ap3", "m_ap4", "m_ap5", "id_TYC", "m_BT", "m_VT", "m_calc", "m_calc-m_ap3";
print "-----", "-----" "\t", "-----" "\t", "-----", "-----", "-----", "-----", "-----", "-----", "-----", "-----";

for (i=1; i<=N; i++) {
    kick=0;
    for(j=1; j<=N; j++) {
        if ((i!=j) && ( (pole[i,1]==pole[j,1]) || ((pole[i,2]-pole[j,2])^2 + (pole[i,3]-pole[j,3])^2) < 100.0)) {
            kick=1;
            break;
        }
    }
    if (kick == 1) {continue;}
    # tohle je ten vztah ze clanku.
    magROTSE = (pole[i,10] - (pole[i,9] - pole[i,10])/1.875);
    difmag="none";
    if ( (pole[i,5] != "none") ) {
        difmag=magROTSE-pole[i,5];
    }

    print pole[i,1], pole[i,2] " ", pole[i,3] " ", pole[i,4], pole[i,5], pole[i,6], \
    pole[i,7], pole[i,8], pole[i,9], pole[i,10], magROTSE, difmag;
}
}'

```

A.3 Skript „makeRefStarsDifsMean“

```

#!/bin/sh

# Tenhle skript je jako dodatek ke skriptu makeRefStarsDifs. Provadi proste
# vypocitani ar. prumeru 12. sloupce i s'odchylkou. Vysledek posle na vystup...

if [ $# = 0 ] || [ $1 = "-h" ] || [ $1 = "--help" ]; then
    echo "usage: $0 <input-file.ref>" 1>&2
    exit 1
fi

cat $1 |
gawk '{
    getline;
    getline;
    i=0;
    sum=0.0;
    do {
        if ($12 != "none") {
            i++;
            pole[i]=$12;
            sum=sum+$12;
        }
    } while(getline)
    N=i;

    mean = sum / N;
    sumSq = 0.0;

    for (i=1; i<=N; i++) {
        sumSq = sumSq + (mean - pole[i])^2;
    }

    s= sqrt( sumSq / (N-1) );
    sm= sqrt( sumSq / N / (N-1) );
    OFS="\t";
    print mean, s, sm

    exit;
}'

```

A.4 Skript „surveyMAT_with_ref_mean-All_script“

```
#!/bin/sh

rm /diplomka/data/photometry/actual.survey.AS
rm /diplomka/data/photometry/actual.survey.nosrt.AS

for dir in /diplomka/data/54b/0_excellent/MAT/ /diplomka/data/54b/1_nearly_excellent_slightly_worse_bgr/MAT/ \
/diplomka/data/54b/2_very_good_worse_bgr/MAT/ /diplomka/data/54b/3_good_quite_bad_bgr/MAT/ ;
do
    cd $dir;
    /diplomka/data/scripts/AS/surveyMAT_with_ref_mean;
done

cd /diplomka/data/54b/

mv /diplomka/data/photometry/actual.survey.AS /diplomka/data/photometry/actual.survey.nosrt.AS
cat /diplomka/data/photometry/actual.survey.nosrt.AS | sort -g > /diplomka/data/photometry/actual.survey.AS
```

A.5 Skript „surveyMAT_with_ref_mean“

```
#!/bin/sh

# Tohle "doluje" pozadovane informace z`.MAT souboru. Navic je na zacatku radky
# odpovidajici redukovane JD a na konci pakstrdni hodnota magnitudy, ktera je
# treba pricist k`magnitudam pro korekci. Posledni dvs sloupce jsou chyba
# jedne ref. hvězdy a chyba tehle zprumerovane hodnoty (v`mag).
# vystupem je soubor
# /diplomka/data/photometry/actual.survey
# ktery lze uz dale pouzivat k`vyrobe grafu :).

ls *.MAT | cut -c -20 | while read name; do

    echo ${name}

    /diplomka/data/scripts/ghku ../fit/${name}.fit MJD >> /diplomka/data/photometry/actual.survey.AS

    cat ${name}.MAT | gawk '{
        i = 0;
        j = 0;
        k = 0;
        pole[j,k]=0;

        do {
            take = 0;
            aperture = 0;
            if (i==5778) {
                j = 1;
                take = 1;
                aperture = 3;
            }
            if (i==5500) {
                j = 2;
                take = 1;
                aperture = 3;
            }
            .
            .
            .
            if (i==1593) {
                j=28;
                take = 1;
                aperture = 3;
            }
            if (i==71) {
                j=29;
                take = 1;
                aperture = 3;
            }
        }

        if (take == 1) {

            if (NF >= 1) {
                if ($(aperture + 3) < "90.0") {
                    pole[j,1]=$(aperture + 3) * 0.96040065;
                }
            }
        }
    }'
```

```

        getline;
        pole[j,2]=$(aperture + 3) * 0.96040065;
    } else {
        pole[j,1]="of";
        getline;
        pole[j,2]="of";
    }

    } else {
        pole[j,1]="na";
        getline;
        pole[j,2]="na";
    }

} else {
    getline;
}

getline;
i++;

} while (getline)

if (pole[1,0]!="na" && pole[1,0]!="of") {
    getline MeanRef < "${name}.MAT.ref.mean.AS'"

    OFS = "\t"

    print "\t" pole[1,1], pole[1,2], pole[2,1], pole[2,2], pole[3,1], pole[3,2], pole[4,1], pole[4,2],\
    pole[5,1], pole[5,2], pole[6,1], pole[6,2], pole[7,1], pole[7,2], pole[8,1], pole[8,2], pole[9,1], pole[9,2],\
    pole[10,1], pole[10,2], pole[11,1], pole[11,2], pole[12,1], pole[12,2], pole[13,1], pole[13,2], pole[14,1],\
    pole[14,2], pole[15,1], pole[15,2], pole[16,1], pole[16,2], pole[17,1], pole[17,2], pole[18,1], pole[18,2],\
    pole[19,1], pole[19,2], pole[20,1], pole[20,2], pole[21,1], pole[21,2], pole[22,1], pole[22,2], pole[23,1],\
    pole[23,2], pole[24,1], pole[24,2], pole[25,1], pole[25,2], pole[26,1], pole[26,2], pole[27,1], pole[27,2],\
    pole[28,1], pole[28,2], pole[29,1], pole[29,2], MeanRef >> "/diplomka/data/photometry/actual.survey.AS";
}

}

done

```

A.6 Skript „srt2tab“

```

#!/bin/bash

# Primitivni utilitka, ktera dela ze SRT / AP souboru (vystup programu muniphot
# od Filipa Hrocha) soubory TAB, tedy lokalni katalogy TST (neboli tab table),
# ktere umi nacist napriklad gaia.
# 2001 Jan Strobl. Hey, it's free!!! :-))

# Well, it's still free and a bit better. mates :)

VERBOSE=false

help="\
Skript na prevod souboru \033[1m.SRT\033[0m (vystup muniphotu od Filipa Hrocha)\
\nna soubor \033[1m.tbl\033[0m, ktery jsou schopny nacist programy gaia a skycat.\
\n\n\033[1m$0 [-v] [-h] <file 1> ... <file n>\033[0m\
\n\nvolby:\
\n\t-h\tTento help\
\n\t-v\tUkecany vystup\
\n\n(c) 2001, Martin Jelinek, Jan Strobl\n"

while getopts ":v" optn; do
    case $optn in
        v)
            VERBOSE=true;
            ;;
        * )
            printf "$help"
            exit 1
            ;;
    esac
done
shift $((OPTIND - 1))
for infile in "$@"; do

    case $infile in

```

